

Modifikace užitečných vlastností fyzikálně lehčených polymerních výrobků pro aplikace v nábytkářském průmyslu

Bc. Marie Jurčová

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marie Jurčová**

Osobní číslo: **T13541**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Řízení jakosti**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Modifikace užitečných vlastností fyzikálně lehčených polymerních výrobků pro aplikace v nábytkářském průmyslu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení výsledků měření

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jakub Huba

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Marie Jurčová

Obor: Řízení jakosti

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 užit 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 26.4.2015



.....

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

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

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k 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 přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem radiačního záření na mechanické vlastnosti pěnového polyetyleny. Hlavním cílem bylo prozkoumat mechanické vlastnosti ozářeného a neozářeného lehčeného polyetyleny a jeho možnou aplikaci v nábytkářském průmyslu. Na základě naměřených hodnot se bude zvažovat o využití materiálu a jeho přesném umístění v matraci. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části jsou popsány základní informace o polyolefínech, lehčených termoplastech a radiačním síťováním. Nakonec jsou popsány námi využívané mechanické zkoušky.

V praktické části je popsán konkrétní materiál a provedené zkoušky. V závěru jsou uvedeny vyhodnocení a porovnání naměřených hodnot.

Klíčová slova: polyetylen, lehčené hmoty, radiační síťování, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

This thesis deals with the influence of radiation on the mechanical properties of polyethylene foam. The main objective was to investigate the mechanical properties of unirradiated and irradiated polyethylene foam and its possible application in furniture industry. According to the measured values will precise location in a mattress will be considered. The work is divided into theoretical and practical part.

The theoretical part describes the basic information about polyolefins, cellular thermoplastics and radiation crosslinking. Finally, at the end a mechanical test methods are described.

The Practical part deals with the specific material. Describes how the tests have been performed, and subsequently evaluates and compares the measured results.

Keywords: polyethylene, cellular materials, radiation crosslinking, mechanical properties

Děkuji tímto vedoucím mé diplomové práce Ing. Jakubu Hubovi, Ing. Davidu Hausnerovi a Ing. Zdeňku Holíkovi Ph.D. za odborné rady, odborné vedení a čas, který mi při psaní této diplomové práci věnovali. Dále bych chtěla velice poděkovat Ing. Mileně Kubišové a doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za velmi cenné rady a čas, který mi věnovali při psaní praktické části v mé diplomové práci. Za pomoc při provádění zkoušek v mé praktické části bych taky ráda poděkovala doc. Ing. Tomáši Sedláčkovi Ph.D., Ing. Davidu Hausnerovi a Ing. Zdeňku Holíkovi Ph.D.

V neposlední řadě bych chtěla také poděkovat své rodině za velkou podporu po celou dobu mého studia.

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

Ve Zlíně

Bc. Marie Jurčová

OBSAH

OBSAH	8
ÚVOD	10
TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYOLEFINY	12
1.1 POLYETHYLEN	12
1.1.1 VÝROBA LDPE	14
1.1.2 VÝROBA LINEÁRNÍHO POLYETYLENU (HDPE, LLDPE)	15
1.1.3 VLASTNOSTI A MOŽNOSTI POUŽITÍ POLYETYLENU	17
2 LEHČENÉ TERMOPLASTY	20
2.1 VLASTNOSTI POLYMERŮ OVLIVŇUJÍCÍ FYZIKÁLNÍ LEHČENÍ.....	22
2.2 NADOUVADLA PRO FYZIKÁLNÍ LEHČENÍ	23
2.3 POSTUPY CHEMICKÉHO LEHČENÍ	25
2.3.1 VYTlačOVÁNÍ LEHČENÝCH TLUSTOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ	25
2.4 UŽITNÉ VLASTNOSTI LEHČENÝCH POLYOLEFINOVÝCH MATERIÁLŮ	26
3 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	29
3.1 PRINCIP SÍŤOVÁNÍ.....	30
3.1.1 ROZDÍLY VE VYUŽITÍ ELEKTRONOVÉHO A GAMA ZÁŘENÍ	30
3.2 URYCHLOVAČE ELEKTRONŮ	33
3.3 MATERIÁLY PRO RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	33
3.4 ZLEPŠENÍ VLASTNOSTÍ PLASTŮ	35
3.5 POUŽITÍ IONIZAČNÍHO ZÁŘENÍ V PRAXI	37
4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU	38
4.1 VLASTNOSTI MATERIÁLU	38
4.2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	38
4.3 PROVEDENÉ ZKOUŠKY	39
4.3.1 STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU A TAŽNOSTI	39
4.3.2 STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI DALŠÍMU TRHÁNÍ	41
4.3.3 STANOVENÍ ODPORU PROTI STLAČENÍ	42
4.3.4 STANOVENÍ TRVALÉ DEFORMACE V TLAKU	43
4.3.5 TRVALÁ DEFORMACE PŘI CYKlickÉM NAMÁHÁNÍ	43
PRAKTICKÁ ČÁST	44
5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI	45
6 POUŽITÉ MATERIÁLY	46
7 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ	47
7.1 ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK ROELL 1456	47
7.2 ZKUŠEBNÍ STROJ INSTRON 8871	48
7.3 MECHANICKÝ VYSEKÁVACÍ LIS	49
7.4 VŘETENOVÝ LIS.....	49
8 POPIS PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH TĚLES	50

8.1	SÍŤOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	50
8.2	TVARY ZKUŠEBNÍCH TĚLES	51
8.2.1	STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU A TAŽNOSTI	51
8.2.2	STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI DALŠÍMU TRHÁNÍ	52
8.2.3	OSTATNÍ ZKOUŠKY	52
9	TAHOVÁ ZKOUŠKA	53
9.1	NAMĚŘENÉ DATA	54
9.1.1	PEVNOST V TAHU TS [KPA]	54
9.1.2	TAŽNOST EB [%]	60
10	ODOLNOST PROTI DALŠÍMU TRHÁNÍ.....	66
11	STANOVENÍ ODPORU PROTI STLAČENÍ.....	73
11.1	NAMĚŘENÁ DATA	73
12	TRVALÁ DEFORMACE PŘI CYKLICKÉM NAMÁHÁNÍ.....	77
13	STANOVENÍ TRVALÉ DEFORMACE	79
	ZÁVĚR	82
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	84
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	86
	SEZNAM OBRÁZKŮ	88
	SEZNAM TABULEK.....	90
	SEZNAM PŘÍLOH.....	91

ÚVOD

Téma diplomové práce vzešlo z konkrétního požadavku v rámci průmyslových aplikací fyzikálně lehčených PE materiálů. Zcela konkrétně se jednalo o požadavek na řešení ze strany firmy SPUR a.s. v oblasti modifikace a zlepšení vlastností PE pěn pro aplikace v nábytkářství – matrace a čalouněné výrobky.

Cílem bylo zvýšit vybrané fyzikální mechanické vlastnosti PE pěn vhodným způsobem tak, aby bylo dosaženo vlastností PUR pěn (v současné době pro tuto aplikaci dominantních) a současně využít pozitivní nízké nasákavosti PE pěn. Tento materiál byl vybrán z důvodu jeho vynikajících vlastností, jako jsou mimořádná chemická odolnost, zdravotní nezávadnost, snadná zpracovatelnost a plná recyklovatelnost. Další výhodou pro námi zvolenou aplikaci je dlouhá životnost a vynikající ohebnost.

Technologie a mechanismus radiačního síťování se ukázal jako teoreticky potenciálně zajímavá cesta ke zlepšení vybraných fyzikálně mechanických vlastností a současně jako řešení přijatelně ekonomické a bez dopadu na stávající technologie základní výroby PE pěny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYOLEFINY

Polyolefiny jsou největší skupinou vyráběných syntetických polymerů. Hlavním důvodem jsou jednak levné petrochemické suroviny, zemní plyn a ropa, z kterých jsou monomery získávány krakováním a rafinací. Mezi další důvody patří specifické užité vlastnosti polyolefinů a jejich snadná zpracovatelnost různými technologickými postupy. [1]

Tab. 1 Charakteristiky nejvýznamnějších polyolefinů [1]

Polyolefin	Krystalinita %	Hustota g cm ⁻³	Teplota tání °C	Modul <i>E</i> MPa	Pevnost v tahu MPa
polyethylen lineární rozvětvený	[—CH ₂ —CH ₂ —] _n	65 až 95	125 až 136	700 až 1 400	20 až 33
		50 až 70	105 až 115	200 až 400	9 až 15
polypropylen izotaktický ataktický	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{—CH}_2\text{—CH—} \end{array} \right]_n$	60 až 70	160 až 176	1 100 až 1 500	34 až 38
		0	0,85 až 0,87 (<i>T_g</i> = -25 °C)	—	—
poly-1-buten izotaktický ataktický	$\left[\begin{array}{c} \text{—CH}_2\text{—CH—} \\ \\ \text{C}_2\text{H}_5 \end{array} \right]_n$	40 až 50	125	200 až 500	10 až 15
		0	0,880 (<i>T_g</i> = -3 °C)	—	—
polyisobutylem ataktický	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{—CH}_2\text{C—} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	0	0,90 až 0,92	—	2 až 6
			(<i>T_g</i> = -73 °C)		
poly-4-methyl- -1-penten izotaktický	$\left[\begin{array}{c} \text{—CH}_2\text{—CH—} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH} \\ / \quad \backslash \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	40	179	1 500	27,5

1.1 POLYETHYLEN

Základní strukturou polyetyleny je uhlovodíkový řetězec, který nese žádné substituenty. Nejdříve byl polyetylen vyráběn jako homopolymer, dnešní komerční polyetyleny jsou však ve velké většině kopolymery ethenu s α -olefiny (1-butenem, 1-hexenem, 1-oktenem nebo 4-methyl-1-pentenem). Polyetylen je vyráběn různými postupy a tvoří širokou paletu produktů s různými zpracovatelskými a užitnými vlastnostmi. Rozmanitost je výsledkem rozdílů v míře krátkého větvení polymerních řetězců a tím i v obsahu krystalické fáze a rovněž rozdílů v molekulové hmotnosti jednotlivých typů PE. Produkty s různým stupněm krystalinity se liší svou hustotou (hustota krystalické fáze PE je 1,00 g/cm³ a amorfní fáze 0,855 g/cm³). Právě hustota polymeru, spolu s charakterizací tvaru řetězce se stala zákla-

dem pro třídění polyetylenů. V tabulce *Tab. 2* jsou uvedena běžně používaná označení polyetylenů a jejich obecné zkratky. [1]

Základními typy jsou LDPE, HDPE a LLDPE, někdy jsou typy s hustotou pod $0,915 \text{ g/cm}^3$ označovány jako ULDPE, produkty o hustotě $0,925\text{--}0,940 \text{ g/cm}^3$ jako MDPE a nově vyvíjené typy s vysokou molekulovou hmotností jako HMWPE nebo UHMWPE. Rozdíly ve tvaru polymerních řetězců tří základních typů jsou důsledkem různých polymeračních mechanismů a kopolymerace s α -olefiny. Radikálovou polymerací vyráběný LDPE je často označován jako rozvětvený polyetylen nebo podle polymeračního tlaku jako vysokotlaký polyetylen, zatímco polyinercí vyráběné HDPE a LLDPE jsou označovány jako lineární nebo též jako nízkotlaké nebo středotlaké polyetyleny. [1]

Tab. 2 Třídění PE podle hustoty [1]

Typ	Zkratka	Hustota (g/cm^3)
PE s velmi nízkou hustotou	ULDPE (Ultra-Low Density)	0,888–0,915
PE s nízkou hustotou	LDPE (Low Density)	0,910–0,955
Lineární PE s nízkou hustotou	LLDPE (Linear Low Density)	0,918–0,955
PE se střední hustotou	MDPE (Medium Density)	0,925–0,940
PE s vysokou hustotou	HDPE (High Density)	0,941–0,954
PE s vysokou molekulovou hmotností	HMW-HDPE (High Molecular Weight HDPE)	0,944–0,954 MH = 200 000–500 000
PE s ultravysokou molekulovou hmotností	UHMW-HDPE (Ultra-High Molecular Weight HDPE)	0,955–0,957 MH = 3 000 000–6 000 000

Rozdíly v charakteru větvení polymerních řetězců tří základních typů polyetylenů:



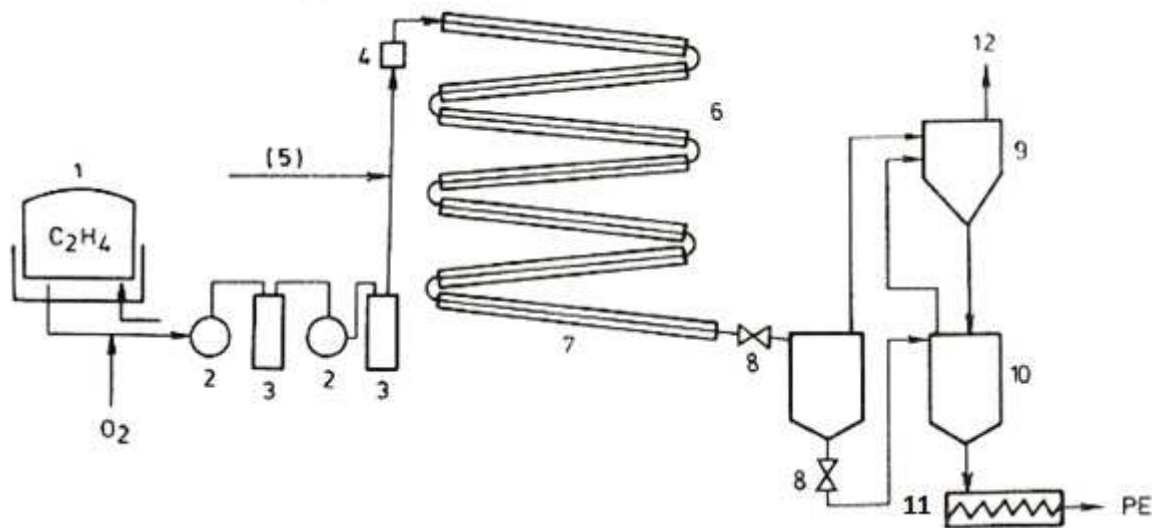
Obr. 1 Struktura makromolekul různých typů PE: 1 – HDPE, 2 – LLDPE (krátké větvení), 3 – LDPE (dlouhé a krátké větvení, a – trubkový reaktor, b – autokláv) [1]

1.1.1 Výroba LDPE

PE s nízkou hustotou LDPE se vyrábí radikálovou polymerací při vysokých teplotách a extrémně vysokých tlacích. Postup byl objeven firmou ICI v roce 1933 a výroba byla zahájena v roce 1938. Dnes se prakticky využívají dva postupy výroby LDPE – polymerace v trubkových reaktorech a polymerace v autoklávech. [1]

Dnešní technologie využívají k iniciaci směsí různých organických iniciátorů – alkyl i acylperoxidů, které iniciují polymeraci ethenu v různých teplotních zónách trubkového reaktoru nebo míchaného autoklávu a jsou voleny podle teplotního profilu v reaktoru. [1]

Charakteristickým znakem vysokotlaké radikálové polymerace ethenu je přenos radikálu na polymer, který vede k dvojímu typu větvení polymerních řetězců. Intermolekulárním přenosem vzniká tzv. dlouhé větvení, které zejména v autoklávových reaktorech v důsledku široké distribuce residenčních časů probíhá ve větším rozsahu i na již vytvořených postranních větvích za vzniku silně větvených molekul dendritického charakteru. LDPE vyrobený v trubkovém reaktoru se proto liší od produktu vyrobeného v autoklávu. [1]



Obr. 2 Vysokotlaká polymerace etylenu (1 – plynojem, 2 – kompresor, 3 – filtr, 4 – explozní pojistka, 5 – iniciátory, 6 – reaktor, 7 – chladič produktu, 8 – redukční ventil, 9 – cyklón, 10 – odlučovač PE, 11 – extrudér, 12 – nezreagovaný ethylen [1]

Vlastnosti produktu mohou být ovlivňovány teplotním profilem v jednotlivých částech reaktoru, koncentracemi různých iniciátorů a regulátorů molekulové hmotnosti i rychlostí průchodu reakční směsi reaktorem. Polymerační doba v reakčních zónách se pohybuje me-

zi 20s až 2min. Na konci reaktoru je dosahováno 30-35% konverze ethenu. Voskovité podíly a nezreagovaný monomer jsou od taveniny polyetyleny oddělovány na několika separátorech. Ethen je recyklován. Tavenina polyetyleny je aditivována antioxidanty, pigmenty, barvivy, plnivý, UV-stabilizátory a dalšími aditivy, extrudována a paletizována. [1]

Obdobné uspořádání mají i výrobní linky s autoklávy. Pracující při nižším tlaku i teplotě – 125 MPa/150°C. Používají se míchané autoklávy jednostupňové se zpětným mísením nebo víceetupňové, kde je zpětné mísení mezi jednotlivými částmi reaktoru omezeno. Doba zdržení reakční směsi v autoklávu je asi 60s. Dosahuje se zde konverze pouze 20%. [1]

1.1.2 Výroba lineárního polyetyleny (HDPE, LLDPE)

HDPE je dnes vyráběn třemi základními technologickými postupy – roztokovým, suspenzním a v plynné fázi. Suspenzní proces je nejstarším postupem, který se do dnes při výrobě HDPE široce používá. LLDPE jsou v podstatě kopolymeru ethyleny s 1-butenem, 1-hexenem, 4-metyl-1-pentenem nebo 1-oktenem a vyrábějí se roztokovým nebo fluidním procesem obdobně jako HDPE. Rozdíly v technologických podmínkách jsou zobrazeny v tabulce *Tab. 3*. [1]

Tab. 3 Rozdíly v technologických podmínkách [1]

Proces	Suspenzní	Roztokový	Plynná fáze
Teplota, °C	85–110	140–300	90–100
Tlak, MPa	2–3	3–20	1–2
Konverze, %	95–98	95	2

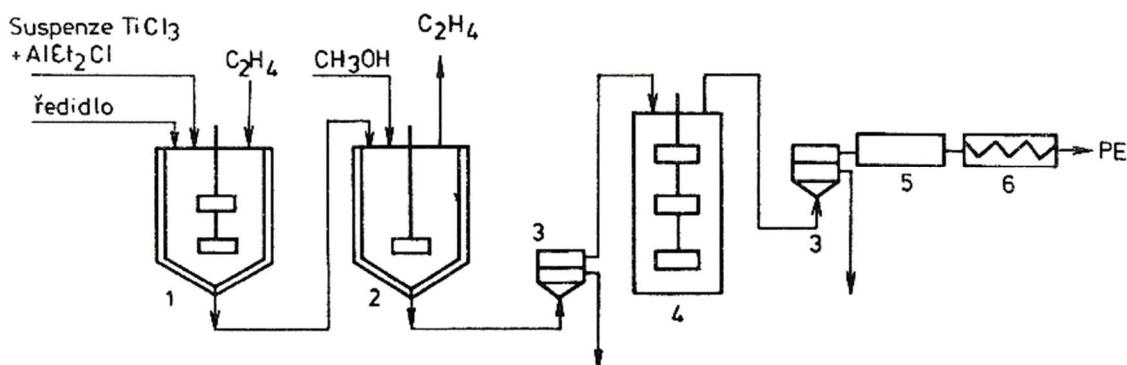
Použité polymerační procesy se obvykle dále dělí podle použitého katalytického systému.

- **Suspenzní postupy**

Suspenzní postup výroby HDPE spočívá ve srážecí polymeraci ethenu v prostředí uhlovdíkového rozpouštědla. Polymerace probíhá při teplotách, kdy je polymer v rozpouštědle nerozpustný. Teplota polymerace musí být nižší než teplota tání polymeru, která souvisí s množstvím kopolymerovaného α -olefinu. Znamená to, že čím nižší má být hustota vyráběného HDPE, tím nižší musí být i polymerační teplota. Rovněž volba rozpouštědla ovlivňuje polymerační podmínky: nižší uhlovdíky jsou výhodné, neboť jsou špatnými rozpouštědly pro polymer, avšak díky jejich nižšímu bodu varu probíhá polymerace při vyšších tlacích. [1]

Různé suspenzní postupy se rozlišují podle bodu varu použitého rozpouštědla a podle typu použitého reaktoru. [1]

Vznikající částice polymeru setrvávají v reaktoru a rostou asi 2 hodiny. Konverze ethenu je zde až 97% a obsah polymeru v suspenzi je kolem 40%. [1]



Obr. 3 Schéma klasického výrobního zařízení pro suspenzní výrobu polyethylenu (1 – polymerační reaktor, 2 – rozkladný reaktor, 3 – odstředivka, 4 – extraktor, 5 – sušárna, 6 – extrudér [1])

- **Roztokové postupy**

HDPE se v blízkosti bodu tání rozpouští ve vyšších uhlovodících, což umožňuje uskutečnění roztokové polymerace. Proces probíhá obvykle při teplotě 150 až 300°C. Tlak v reaktoru závisí nejen na teplotě, ale též na typu rozpouštědla, typu monomeru a konverzi monomeru a pohybuje se od 0,3 až do 20 MPa. Vyšším tlakem se zabraňuje separaci fází, které vznikají při vyšších teplotách. Technologie jsou kontinuální s využitím Zieglerových katalyzátorů a H_2 jako regulátoru molekulové hmotnosti. Doba zdržení polymeru v reaktoru se pohybuje kolem 10 min. Konverze ethenu dosahuje 95%. Roztok opouštějící reaktor obsahuje 17 až 25% polymeru. Katalyzátor musí být deaktivován a následně odstraněn v absorpční koloně. Rozpouštědlo a nezreagované monomery jsou recyklovány.

Roztokové postupy poskytují PE s širokým rozmezím hustot, avšak v důsledku neúnosně vysokých viskozit reakční směsi. [1]

- **Polymerace v plynné fázi**

Polymerace v plynné fázi je nejnovější technologie výroby HDPE. Technologie se vyznačuje nízkými investičními i provozními náklady. Proces je vysoce flexibilní a pracuje s různými typy katalyzátorů, což umožňuje výrobu produktů HDPE i LLDPE s širokým rozmezím hustot i širokým rozmezím molekulových hmotností. [1]

Ethylen je polymerován ve fluidní vrstvě v plynné fázi bez použití kapalného média. Používá se vysoce aktivní katalyzátor, který není potřeba po polymeraci odstraňovat.

U fluidního procesu odpadají problémy spojené s viskozitou nebo rozpustností, které jsou obvyklé u suspenzních nebo roztokových technologií. Odpadá i recyklace rozpouštědel. Ethen jako monomer současně působí jako medium pro přenos tepla a fluidizuje reakční směs. Velké reaktory s dlouhými časy zdržení mají dobrou procesní stabilitu a umožňují střídání sortimentu HDPE a LLDPE. Určitou nevýhodou procesu je vysoká citlivost katalyzátorů ke katalytickým jedům a také pouhé 2% konverze ethenu na jeden průchod reaktorem. [1]

1.1.3 Vlastnosti a možnosti použití polyetylenu

Polyetylen je tuhá látka vyráběná v tenkých vrstvách nebo filmech, ohebná, elastická, téměř průhledná, popř. s mléčným zákalem. Na omak má voskovitý charakter. Všechny druhy PE mají vysokou krystalinitu. Teplota tání se pohybuje mezi 105 až 136°C. Polyetylen má vysokou houževnatost a tažnost. Polyetylen je velmi stálý proti chemickým činidlům a za normální teploty se nemění účinkem H_2SO_4 , HCl, HNO_3 i HF. Omezená je jeho stálost proti oxidačním činidlům. Za normální teploty se nerozpouští v žádném rozpouštědle. Při teplotách nad 50°C se většina typů polyetylenů rozpouští v aromatických nebo chlorovaných uhlovodících či v dekalinu. Svými dielektrickými vlastnostmi a nízkou hustotou se polyetylen podobá alkanickým uhlovodíkům. Polyetylen nepropouští vodní páru a je mrazuvzdorný. Absorbuje tuky, uhlovodíky, aminy, ethery, ketony i jiné kapalné organické sloučeniny, které jím zvolna difundují. Podléhá studenému toku a má sklon k praskání pod napětím. [1]

Nestabilizovaný polyetylen patří mezi plasty s nízkou odolností proti povětrnosti, zejména proti slunečnímu záření. Rychlost fotooxidačního odbourávání stoupá s koncentrací terciálních uhlíků v řetězcích a klesá se zvyšující se krystalinitou, neboť k fotooxidaci dochází hlavně v amorfních oblastech polymeru. Antioxidanty v polyetylenech mají vysokou stabilizační účinnost proti tepelné oxidaci, ale jsou málo účinné proti fotooxidaci. Nejúčinnějším stabilizátorem polyetylenu jsou saze. Způsob přípravy ovlivňuje strukturu, rozsah větvení, molekulovou hmotnost a distribuci molekulových hmotností, přičemž rozmezí hustot a indexu toku taveniny, které jednotlivé výrobní technologie umožňují dosáhnout, jsou odlišné. [1]

Zásadní rozdíl mezi jednotlivými komerčními typy polyetylenů je ve stupni krystalinity, se kterým souvisí hustota polymeru a v molekulové hmotnosti, která ovlivňuje jeho index toku. Komerční polyetylen tak tvoří celou škálu produktů s charakteristickými obecnými vlastnostmi. [1]

Výhodnými charakteristikami PE jsou [1]:

- Nízká cena
- Snadná zpracovatelnost
- Výborné elektroizolační vlastnosti
- Velmi dobrá chemická odolnost
- Tuhost a vláčnost i při nízkých teplotách
- Průhlednost tenkých fólií
- Nízká permeabilita vodních par
- Zdravotní nezávadnost

Použitelnost PE je omezena [1]:

- Nízkým bodem měknutí
- Sklonem níže molekulárních typů k praskání pod napětím
- Sklonem k oxidaci
- Zákalem materiálu v tlustších vrstvách
- Voskovitým vzhledem a nízkou odolností proti poškrábání
- Nízkou pevností v tahu
- Vysokou permeabilitou plynů
- Hořlavostí

Polyetylen se zpracovává všemi obvyklými metodami zpracování termoplastů. Hlavní základní požadavky na prvotřídní komerční produkt jsou dobrá zpracovatelnost a vyrovnaná kvalita. Pod pojmem dobré zpracovatelnosti rozumíme snadnost, se kterou lze polymer přeměnit z granulí dodávaných výrobcem na film, laminovanou fólii, vstřikovaný nebo vyfukovaný výrobek, vytlačenou trubku či jiný profil apod. Zpracovatelnost je determinována molekulární strukturou, uniformitou produktu a obsahem aditiv, přičemž k hustotě a indexu toku, které určují základní zpracovatelské vlastnosti, přistupuje mimo jiné i citlivost materiálu na tlak a teplotu, míra smrštění po vychladnutí, kouření a zápach. [1]

Převážná část produkce rozvětveného polyetyleny je zpracovávána na fólie. Dalším hospodářsky velmi významným aplikačním polem je oplášťování kabelů a vodičů.

Polotovary z polyetyleny lze ohýbat a tvarovat. Pro spojování dílců z polyolefinů se osvědčilo svařování. Nepochární chemická struktura polyolefinů vede k potížím při lepení a potiskování. Tyto potíže lze překonat ožehnutím plamenem, koronovým výbojem nebo ponořením do kyseliny chromsírové. [1]

2 LEHČENÉ TERMOPLASTY

Lehčené termoplasty jsou polymery, které jsou využívány již od 2. Světové války a pronikly prakticky do všech oblastí běžného života. Nejčastěji využívanými technologiemi výroby jsou vytlačování, expanze kuliček ve formě a lehčení PE se síťováním. [2]

Základním prvkem lehčených termoplastů je polymerní materiál. Význam tohoto polymeru roste s růstem expanze. Materiál musí být schopen udržet nadouvadlo v průběhu procesu lehčení a někdy také v produktu při jeho použití. Většina polymerů má schopnost udržet nadouvadlo v průběhu procesu lehčení, ale s ohledem na zpracovatelské požadavky a poměr nalehčení se používají jen některé termoplasty. [2]

Do lehčitelných termoplastů se řadí tyto:

- Polystyren
- Polyolefiny
- Polyvinyl (chlorid, acetát..)
- Polyetylenetereftalát

Největší využití lehčených materiálů je v oblasti stavebnictví, potravinářství, výroba obalů, v oblasti rekreace a automobilovém průmyslu. [2]

Síťování vytváří modifikaci morfologii polyolefinu vznikem dodatečných vazeb mezi řetězci polymeru. Polymer pak ve stavu taveniny vykazuje zhoršení toku, zvýší se tepelná stabilita, čímž vznikne materiál vhodný pro tepelné tvarování. [2]

Zajímavé je použití směsí polymerů pro lehčení ve vyhřívané lehčící komoře, což je postup jen minimálně zatížený smykovým namáháním před lehčením a během něj. Výrazně lze takto zvýšit užité vlastnosti. Např. PP má tendenci být křehký, avšak po proběhnutí síťování je poddajný a má vysokou tepelnou odolnost. [2]

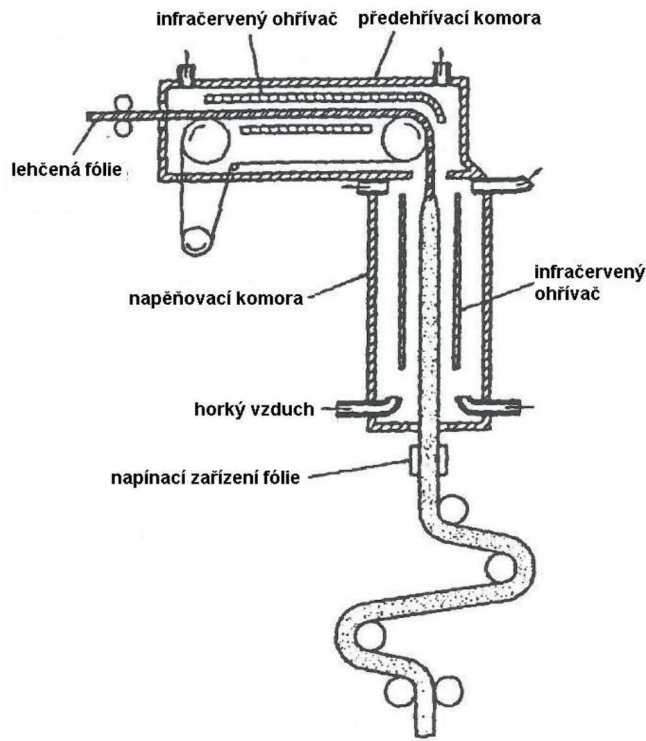
Dutinky v lehčených materiálech mohou být buď otevřené, nebo uzavřené. Zvolený polymer a způsob výroby pak určují elektrické, mechanické, chemické, tepelné a další vlastnosti lehčeného materiálu. Hustota lehčených materiálů je mezi 10 – 800 kg.m⁻³. U některých materiálů může hustota vyjíměčně převyšovat i 1000 kg.m⁻³. Tyhle materiály se řadí spíše k mikrocelulárním. [3]

Existují tři druhy výrobních postupů pro výrobu lehčených materiálů:

- 1) Metody založené na přidání zkapalněného plynného nadouvadla do objemu termoplastu při jeho zpracování – fyzikální lehčení
- 2) Metody, kdy je do objemu termoplastu při jeho zpracování uvolňován lehčící plyn z pevného nadouvadla, které je součástí zpracovávané receptury – chemické lehčení
- 3) Metody kombinující oba výše uvedené postupy

I když je použito obdobné nadouvadlo, neznamená to, že bude výsledek vždy stejný. Závisí také na zvoleném polymeru a způsobu zpracování, zvolených aditivech a zpracovatelských parametrech. [3]

Úkolem nadouvadla je expanze termoplastu za vzniku lehčené struktury, která má daleko nižší hustotu než původní polymer. Bublinky v polymeru vznikají v nukleačních bodech a expandují pomocí dodání tepla nebo snížení tlaku, nebo pomocí chemické reakce. Proces pak pokračuje náhradou nadouvacího plynu v dutinkách struktury vzduchem.[3]



Obr. 4 Vertikální lehčení sítovaného PE [3]

2.1 Vlastnosti polymerů ovlivňující fyzikální lehčení

Lehčení polyolefínů pomocí přímého vstříknutí plynu či procesem fyzikálního lehčení je velmi citlivé na udržení rovnováhy mezi pevností taveniny lehčeného polymeru a tlakem nadouvacího plynu v rostoucích dutinkách lehčené struktury. Celý proces probíhá při teplotě velice blízké teplotě krystalizace polymeru a končí při přechodu stěn dutinek do tuhé fáze. [4]

Nejdůležitější parametry procesu fyzikálního lehčení a důležité vlastnosti taveniny související s typem polyolefínu, které jsou významné pro fyzikální lehčitelnost jsou [4]:

- Teplota tání (tavení) a krystalizace polyolefínu
- Viskozita v průběhu tavení, míchání a chlazení taveniny polymeru
- Viskozita v oblasti teploty krystalizace
- Eloganční viskozita v oblasti teploty krystalizace

Růst eloganční viskozity je zásadní podmínkou pro vytvoření vhodné lehčené struktury. Vytlačování lehčených polyolefínů pomocí přímého vstříkování plynu neboli tzv. fyzikální lehčení lze rozdělit do pěti charakteristických kroků [4]:

- 1) Tavení pevného granulátu polyolefínu
- 2) Vstříknutí a zamíchání zkapalněného plynu nebo kapaliny do taveniny polymeru
- 3) Chlazení a tváření taveniny za podmínek expanze - rozpínání
- 4) Lehčení – napěňování taveniny pomocí expanze plynu
- 5) Ochlazení lehčeného výrobku – pěny

Viskozita a chování polymeru při tavení / krystalizaci hrajou významnou roli ve většině uvedených kroků procesu, avšak klíčovým krokem lehčícího procesu je expanze plynu.

Pro dosažení kvalitního lehčeného materiálu, musí být tavenina s vmíchaným plynem ochlazená na teplotu blízkou teplotě krystalizace semikrystalických polyolefínů, aby došlo ke zvýšení viskozity a zkrácení času potřebného pro přechod z taveniny do pevné fáze. [4]

2.2 Nadouvadla pro fyzikální lehčení

Fyzikální nadouvadla se prosadila u většiny aplikací, speciálně s nízkou hustotou a s vysokými požadavky na homogenitu lehčeného materiálu. Výběr fyzikálního nadouvadla má velký vliv na kvalitu lehčeného materiálu a náklady lehčených výrobků. Největší roli hraje bezpečnost pro životní prostředí. [5]

Velice dobrými vlastnostmi a jednoduchou manipulací vynikaly chlorované fluorovodíky (freony), ale byl udělen celosvětový souhlas se zákazem použití těchto látek pro nadouvadla. Tyhle látky vedly k narušování ozonové vrstvy. Další nebezpečné látky pro životní prostředí jsou částečně halogenované fluorovodíky. Jsou zakázány v mnoha zemích. Alternativami jsou uhlovodíky, např. izobutan a pentan, CO₂ a dusík. Nejpoužívanější je CO₂, protože má mnohem vyšší rozpustnost v polymerech než dusík. [5]

Další výhodou je, že CO₂ se nemusí speciálně vyrábět, vzniká jako vedlejší produkt u jiných výrobních procesů. Před vlastním použitím jako nadouvadlo se plyn čistí, suší a pod tlakem se zkapalňuje. [5]

Inertní plyny mají řadu výhod [5]:

- Ekologická přijatelnost, protože nemají žádný potenciál k narušování ozonové vrstvy a mají jen minimální potenciál ke globálnímu oteplování Země
- Nižší spotřeba plynu, z důvodu vyššího stupně napěňování
- Vysoká ekonomická efektivnost
- Nehořlavost
- Netoxičita
- Chemická inertnost
- Žádné zbytky v lehčeném materiálu

V současné době se využívají i další fyzikální nadouvadla např. „expandovatelné mikrokuličky“. Používají se k získání rovnoměrné lehčené struktury s drobnými buňkami ve vstřikovaných a vytlačovaných výrobcích, u které snižují hmotnost, zlepšují zvukovou izolaci a tlumící vlastnosti a optimalizují výrobky pro specifické vlastnosti. [6]

Tab. 4 Přehled fyzikálních nadouvadél [4]

Nadouvadlo	Chemický vzorec	Mol. hmotnost g.mol ⁻¹	Bod varu °C	Tenze par psi	Hořlavost	Hustota g.cm ⁻³	Tepelná vodivost W.(m.K) ⁻¹
Propan	C ₃ H ₈	44,1	-42,1	137,89	ano	0,49	0,0179
n-butan	C ₄ H ₁₀	58,1	-0,5	35,26	ano	0,55	0,0159
i-butan	CH ₃ (CH ₃)CHCH ₃	58,1	-11,7	50,53	ano	0,55	0,0161
n-pentan	C ₅ H ₁₂	72,2	36,1	9,9	ano	0,621	0,0141
i-pentan	CH ₃ (CH ₃)CHCH ₂ CH ₃	72,2	27,0	14,3	ano	0,615	-
HCFC-22	CHF ₂ Cl	86,5	-40,8	151,4	ne	1,194	0,0106
HCFC-142b	CF ₂ ClCH ₃	100,5	-9,2	49,16	ano	1,11	0,0108
HFC-152a	CHF ₂ CH ₃	66,0	-24,7	86,81	ano	0,899	0,0136
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	153,0	27,1	13,27	ne	1,46	0,0095
HCFC-123a	CHFCICF ₂ Cl	153,0	28,2	12,61	ne	1,467	0,0111
HCFC-124	CHFCICF ₃	136,5	-12,0	55,85	ne	1,356	0,0106
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	102	-26,5	96,52	ne	1,207	0,0127
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	84	-46,7	182,5	ano	1,089	0,0137
CFC-11	CFCl ₃	137,4	23,8	15,32	ne	1,476	0,0082
CFC-12	CF ₂ Cl ₂	120,9	-29,8	94,51	ne	1,311	0,0100
CFC-113	CFCl ₂ CF ₂ Cl	187,4	47,6	6,46	ne	1,565	0,0097
CFC-114	CF ₂ ClCF ₂ Cl	170,9	3,6	30,96	ne	1,456	0,0112
MeCl	CH ₃ Cl	50,5	-24,2	82,16	ano	1,098	0,0106
MeCl ₂	CH ₂ Cl ₂	84,9	40,1	8,22	ne	1,322	0,0084
oxid uhličitý	CO ₂	44,0	-78,5		ne		0,0165
dusík	N ₂	28,0	-195,8		ne		0,0258
kyslík	O ₂	32,0	-183		ne		0,0266

Pro dosažení jemné a rovnoměrné lehčené struktury je třeba dodat i nukleační činidlo mimo nadouvadla. Nukleační činidlo vytváří místa, kde dochází k uvolnění fyzikálního nadouvadla při expanzi lehčeného materiálu. Nukleační místa jsou startovními body pro vznik a růst dutinek lehčené struktury. Když vytvoří nukleační činidlo více nukleačních míst, tak může vzniknout více dutinek lehčené struktury a průměrná velikost dutinek se bude snižovat. Počet nukleačních míst ovlivňuje také rychlost expanze. Expanze lehčené taveniny je proces řízený difuzí. Čím větší dutinky jsou, tím víc potřebují času na růst, protože nadouvadlo musí taveninou polymeru difundovat k další rostoucí dutince a tak urazit delší cestu. V důsledku této skutečnosti expandují lehčené materiály s jemnou strukturou daleko rychleji než lehčené materiály s hrubší strukturou. [7,8]

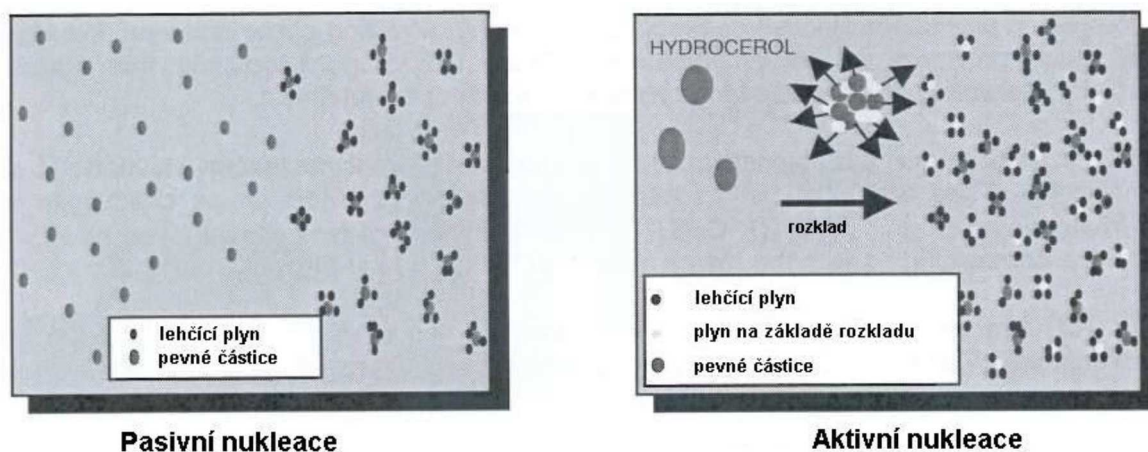
Nukleační činidla se dají rozdělit do dvou skupin:

- Aktivní
- Pasivní

Mezi pasivní nukleační činidla patří pevné materiály s jemnými částicemi, jako jsou mas-tek, hlinka, křemelina, uhličitán vápenatý, oxid křemičitý. Nukleace tu probíhá vytvořením

překážky v systému, když dochází k uvolňování nadouvadla a vzniku bublinek. Účinnost těchto materiálů je dána tvarem a velikostí částic. [7,8]

Aktivní nukleací je nazývána nukleace systému s přímým vstřikováním nadouvacího plynu pomocí chemického nadouvadla. Aktivní nukleační činidla jsou účinnější a poskytují menší a rovnoměrné dutinky lehčené struktury oproti neaktivním systémům. Aktivní nukleací činidla lze díky větší účinnosti využívat v menších koncentracích než neaktivní nukleací činidla. Pro dosažení stejné kvality lehčeného materiálu je potřeba mít 3-8krát víc neaktivních systémů než aktivních činidel. Dávkování aktivních činidel ovlivňuje jakost lehčeného materiálu a hustotu lehčeného materiálu.[7,8]



Obr. 5 Pasivní a aktivní nukleace

2.3 Postupy chemického lehčení

U termoplastů je vyvolán proces lehčení ohřevem. Zároveň se ze směsi odpařují zapracované relativně nízkovroucí látky, jako monomery nebo rozpouštědla – lehčení fyzikální, nebo mechanicky vmísená nadouvadla a rozkládají se za vzniku plynu – lehčení chemické. Těmito postupy lze zpracovávat téměř všechny termoplasty. [9]

2.3.1 Vytlačování lehčených tlustostěnných výrobků

Lehčené materiály mohou mít různou tvrdost, od tuhých, které lze využít např. ve stavebnictví, až po měkké, které se využívají třeba na obalové a výplňové materiály. [10]

- **Proces vytlačování**

Polymer vstupuje do tavicí zóny vytlačovacího stroje, přes násypku. V tavicí zóně se polymer převádí na taveninu a ta je dále dopravována až do míchací zóny, kde je polymer

pod tlakem důkladně promícháván s nadouvadlem. Dále taveninu ochladíme a probíhá nalehčení. Nadouvadlo se do vytlačovacího stroje vstříkují v oblasti mezi dopravní a máchací zónu. Směs termoplastu s nadouvadlem je pak pomocí vytlačovací hlavy vytlačována do oblasti s nižším tlakem, obvykle atmosférickým. V těchto místech dochází k expanzi nadouvadla a vzniku dutinek lehčené struktury. Pak se musí lehčený termoplast ochladit. [10]

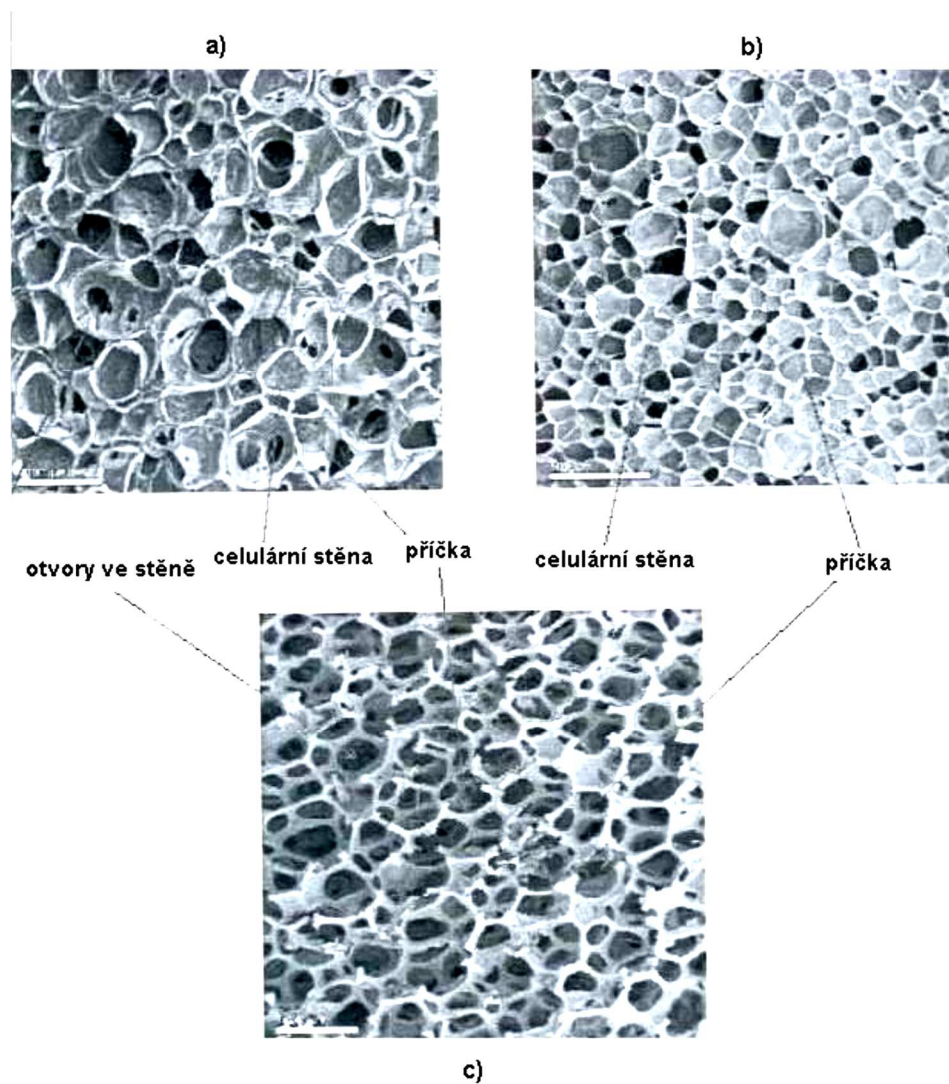
2.4 Užité vlastnosti lehčených polyolefinových materiálů

Základem pro výrobu lehčených materiálů je hluboká znalost mezi strukturou a vlastnostmi. Pokud tento vztah dostatečně známe, můžeme rozpoznat, jaké jsou hlavní strukturální charakteristiky (hustota, velikost dutinek lehčené struktury, podíl otevřených dutinek, anizotropie, chemické složení atd.), které mají být modifikovány, proto abychom získali optimální kombinaci vlastností pro danou aplikaci. [10]

Fyzikální vlastnosti lehčených materiálů závisí na řadě faktorů, z nichž některé jsou nezávislé:

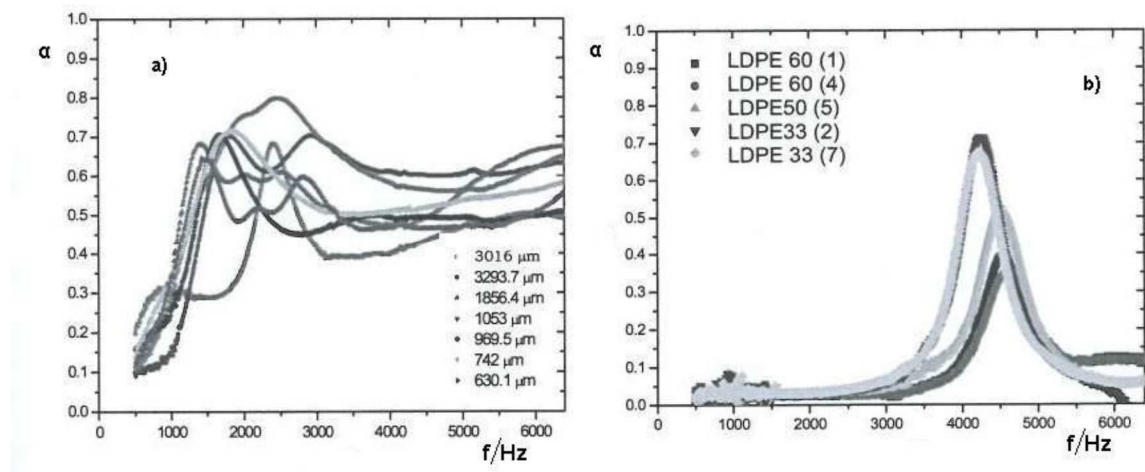
$$X=X(\rho, CP, CS, PM, GE \text{ atd.}) \quad (1)$$

kde X je fyzikální vlastnost, ρ je hustota, CP je chemické složení, CS je struktura dutinek, PM morfologie polymeru a GE typ plynu uzavřeného v dutinkách. Pokud je takhle komplikovaná závislost známá, lze ji s výhodou použít pro výrobu „šitou na míru“. [10]



Obr. 6 Srovnání struktury a)lehčeného polyolefinu s otevřenými dutinkami, b) lehčeného polyolefinu s uzavřenými dutinkami a c) polyuretanu se strukturou otevřených dutinek [10]

Lehčené materiály s uzavřenými dutinkami mají strukturu tvořenou z dutinek tvaru mnohostěňů, kde jsou dutinky izolovány pevným povrchem – ploškami (stěny dutinek) a hrany jsou umístěny v místě průniku stěn dutinek. U lehčených materiálů s otevřenou strukturou dutinek jsou elementy struktury podobné, jsou zde taky hrany a plošky, ale většina stěn dutinek je přítomna v podobě děr, které mohou být velké nebo velmi malé. V případě PUR je struktura postavená z hran, takže zde chybí plošky – stěny dutinek. [10]



Obr. 7 Zvuková pohltivost lehčených polyolefinů a) s otevřenými dutinkami, b) s uzavřenými dutinkami [10]

V grafu lze pozorovat rozdíl mezi akustickými vlastnostmi lehčených polyolefinu se strukturou otevřených dutinek a několika lehčených polyolefinu se strukturou uzavřených dutinek. Je zřejmé, že lehčené polyolefiny s otevřenými dutinkami vykazují v intervalu 1 – 6 kHz značnou zvukovou pohltivost. Lehčené polyolefiny s uzavřenou strukturou dutinek mají maximum absorpce zvuku lokalizováno do oblastí frekvencí 4 – 5 kHz. [10]

3 RADIČNÍ SÍŤOVÁNÍ

U plastů je síťování chemický proces, při kterém se jednotlivé molekuly chemicky navzájem spojují. V ideálním případě může dojít k začlenění všech molekul do sítě. U mnohých plastů lze k tomuto ideálnímu stavu dojít pomocí ozáření. [11]

Radiačním síťováním (beta a gama) optimalizujeme levnější nebo konstrukční plasty a zlepšujeme tím mechanické, tepelné a chemické vlastnosti. Vytváříme tak plasty s vlastnostmi vysoce odolných konstrukčních plastů. Je to jednoduchá a ekologická metoda se širokou oblastí možného využití. Radiačním síťováním lze např. z termoplastu vytvořit materiál, který vykazuje v určitých teplotních oblastech vlastností elastomerů. [11]

Tohle lze aplikovat i u [11]:

- Izolací kabelů a drátů
- Trubkových profilů a hadic
- Tvarovaných a vstříkovaných dílů
- Kompozitních materiálů
- Polymerních granulátů

Nejdůležitějšími vlastnostmi síťovaných systémů jsou tažnost a pružnost. Tyhle vlastnosti přetrvávají i při dlouhodobém teplotním a mechanickém zatížení. Radiačním síťováním vytváříme takové materiály, které se ve spoustě vlastnostech chovají jako elastomery. Elastomerické vlastnosti se projevují hlavně nad teplotou tání krystalů resp. Teplotou skelného přechodu neozářeného polymeru. Výrobek vlivem záření může odolávat daleko vyšším teplotám. Tvarová stálost při působení tepla je značně zlepšena v porovnání s původním neozářeným termoplastickým materiálem. Výrazně toto zlepšení pozorujeme u smykového modulu jako funkce teploty. Parametrem je dávka ozáření odpovídající stupni zesíťování.

Při překročení teploty přechodu klesne smykový modul u nezesíťovaných termoplastů prakticky na nulu. U zesíťovaného termoplastu lze naměřit menší hodnotu modulu, který se avšak v závislosti na stupni zesíťování zvyšuje. [11]

U tepelných vlastností dochází v důsledku síťování k [11]:

- Zlepšení tvarové stálosti za tepla
- Cílenému nastavení teplotní roztažnosti
- Zlepšení trvalé deformace při zatížení tlakem (tahem)
- Zvýšení tepelné odolnosti

- Zvýšení odolnosti proti působení žhavým drátem
- Vyšší odolnosti proti stárnutí

3.1 Princip síťování

U ionizujících záření se jedná buď o elektromagnetické vlny (záření gama) nebo o částicové záření (elektronové – beta záření).

Aby byly plasty odolnější větším zatížením, přivedeme molekuly ke vzájemnému chemickému propojení. Toto síťování se dá řídit zářením bohatým na energii nebo gama zářením. Materiál absorbuje energii vzniklou zářením a vznikají radikály, které spolu reagují při následné chemické reakci a vytváří očekávané spojení, tzv. link.

Při radiačním síťování většinou nepotřebujeme další přísady. Velkou výhodou je, že síťování se provádí až po zpracovatelském procesu (po vstříkovaní, vytlačování nebo vyfukování). Proces síťování probíhá při pokojové teplotě. [11]

3.1.1 Rozdíly ve využití elektronového a gama záření

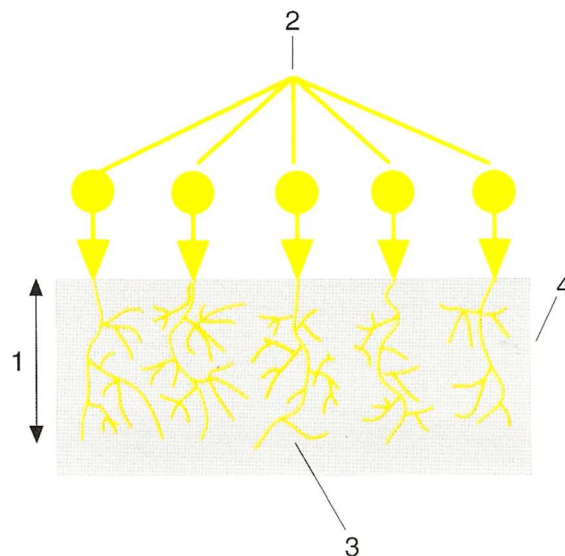
Hlavní rozdíl spočívá ve schopnosti pronikání materiálem a intenzitě dávky.

- **Beta záření**

Toto síťování probíhá v zařízeních s urychlovači elektronů. Základní princip elektronového urychlovače je srovnatelný s Braunovou elektronkou nebo rentgenkou. Žhavicí katoda emituje elektrony. Tyto elektrony jsou urychlovány v elektromagnetickém poli. Rychlost elektronů je pak závislá na střídavém napětí mezi žhavicí katodou a anodou.

Pracuje se zde s vysokými intenzitami dávek ozáření, avšak s omezenou hloubkou vniknutí závislou na energii. Užitečná hloubka vniknutí je nastavitelná volbou energie elektronů. Často se využívá ozáření ze dvou stran, protože je hospodárnější.

Elektronové beta záření se využívá pro síťování většiny polymerních materiálů, protože potřebují vysoké dávky záření, které jsou v urychlovačích elektronů dodány během několika sekund. [11]



Obr. 8 Princip elektronového záření

1 – hloubka vniknutí elektronů, 2 – primární elektrony, 3 – sekundární elektrony, 4 - ozářený materiál[11]

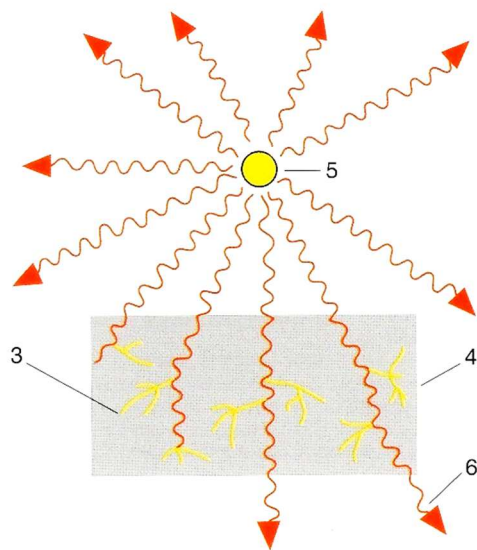
- **Gama záření**

Záření typu gama má vysokou schopnost průniku už při nízké intenzitě záření. Výkon dávky ozáření je závislý na instalované celkové aktivitě zdroje záření. Jako zdroj záření se u průmyslových zařízení se zářením gama využívá radio nuklid kobaltu (Co^{60}), který emituje záření gama se střední energií cca 1,3 MeV a vysokou hloubkou průniku.

Celkové dávky ozáření se dosahuje opakovaným objížděním palet kolem zdroje záření. Doba ozařování trvá v závislosti na požadované dávce až několik hodin. U gama záření nelze samostatný zdroj tohoto záření vypnout. Proto se zdroje Co^{60} musí uschovat pod hladinu vodní nádrže. Sloupec vody nad zdrojem záření plní funkci clony.

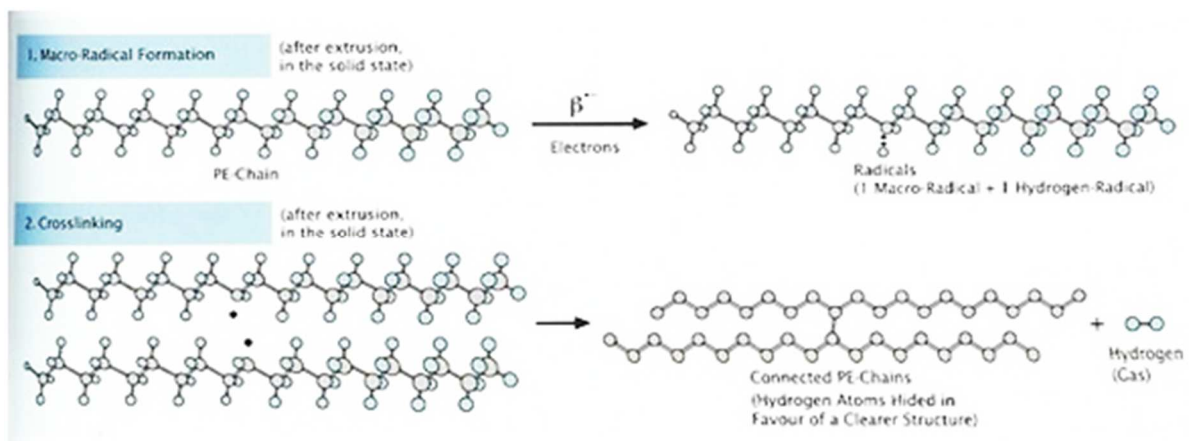
Gama záření se používá pro sítování složitých objemových tvarových dílů. Poskytuje oproti elektronovému záření výhody z hlediska větší hloubky proniknutí.

Hlavní oblastí použití je v současnosti radiační sterilizace zdravotnických produktů a potravin.[11]

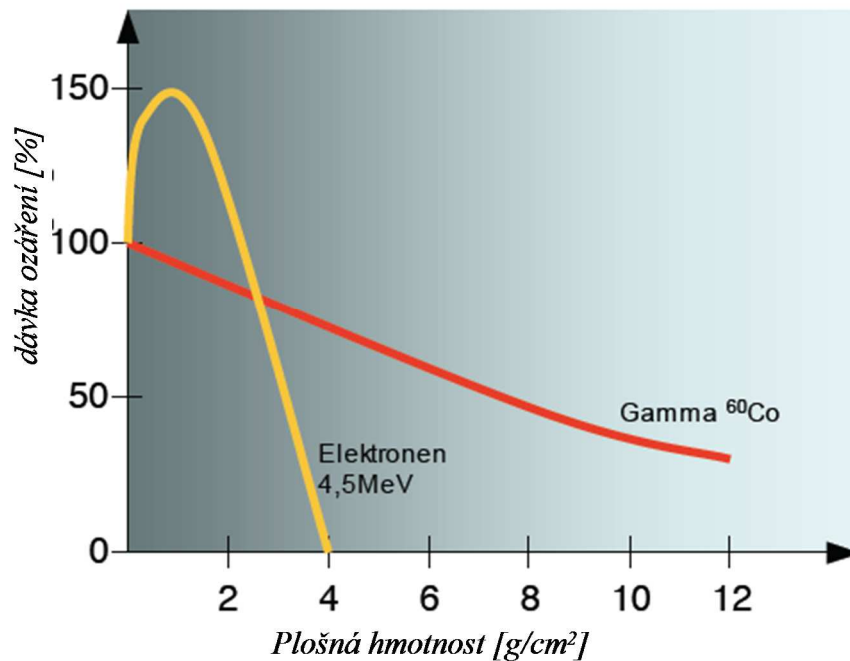


Obr. 9 Princip gama záření

3 – sekundární elektrony, 4 - ozářený materiál, 5- zapouzdřený zdroj Co^{60} , 6 – kvanta[11]



Obr. 10 Schéma sítěvání PE elektronovým zářením[11]



Obr. 11 Schopnost pronikání elektronového- β a gama- γ záření[11]

3.2 URYCHLOVAČE ELEKTRONŮ

Princip elektronového urychlovače je srovnatelný s Braunovou elektronkou nebo rentgenkou. Žhavicí katoda emituje elektrony, které jsou urychlovány v elektromagnetickém poli. Rychlost (energie) elektronů je závislá na střídavém napětí mezi žhavicí katodou a anodou.

Žhavicí katoda je napojena na svislou urychlovací trubici, která je naplněna vysokým vakuem. Z katody vystupující elektrony jsou „vázány“ elektromagnetickým polem do svazků a urychlovány. [11]

Elektrony jsou pomocí magnetického střídavého pole odchýleny tak, že na ústí snímacího trychtýře vstupuje vějířovitý proud elektronů na výrobek. [11]

3.3 MATERIÁLY PRO RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ

Užité vlastnosti výrobků jsou rozhodující pro výběr vhodného materiálu. Využitím technologie radiačního síťování mohou být realizovány výrobky s mimořádnými technickými výhodami a s efektem ekonomického zisku.[11]

Tab. 5 Klasifikace polymerů podle jejich reakce na ionizující záření [12]

Polymery s převažujícím síťováním	Polymery s převažující degradací
Polyetylén	Polyisobutylen
Polypropylen	Poly(vinyl fluorid)
Polyester	Polyakrylonitril
Polyuretan	Poly(methyl metakrylát)
Poly(vinyl alkohol)	Polyoxymehtylen
Poly(vinyl acetat)	Poly(propylen sulfid)
Polybutadien	Poly(ethylen sulfid)
Polychloropren	
Přírodní kaučuk	
Chlorovaný polyethylén	
Polyamid	

Při určování vhodnosti polymerů pro ozařování se berou v úvahu i některé další faktory uvedené níže:

Teplota – zvýšená teplota podporuje vyšší míru radiačně-chemické přeměny v polymeru. To je zvláště patrné při průchodu taveninou nebo při teplotě skelného přechodu. [12]

Fázový stav polymeru – účinnost radiační přeměny v polymerech se zvyšuje jejich přechodem ze skelného na vysoce elastický stav a víc se zvětšuje při přechodu do viskózního stavu. Pokud polymer obsahuje viskózní a krystalické fáze bude radiačně-chemická přeměna probíhat rychleji v amorfni části a na rozhraní, než v krystalické fázi. [12]

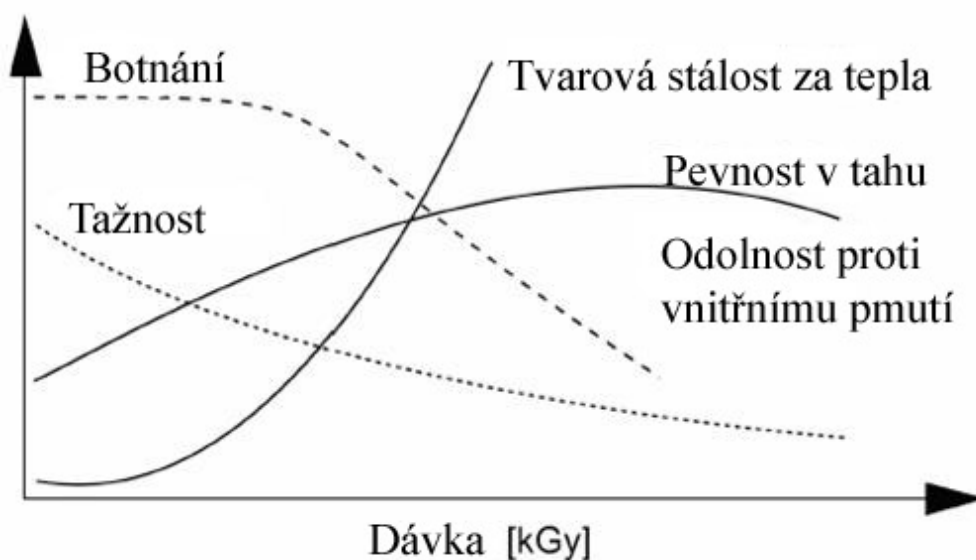
Vady v polymerních materiálech – tuhé polymery vždy obsahují některé druhy vad: mikrodutiny, mikrotrhliny, nečistoty, rozhraní, atd., které ovlivňují prostorové lokalizace energie ionizujícího záření. Proto, radiační odolnost polymeru závisí také na jeho historii.

Tlak – rychlost a směr transformace polymerů jsou hluboce ovlivněny vnějším tlakem, například při vysokém tlaku (okolo 3GPa) se snižuje degradace polymeru. U elastomerů vystavených velkému tlaku při radiačně-chemickém procesu, probíhá síťování 3 - 15x rychleji než u atmosférického tlaku. [12]

Ozáření – kombinované působení ionizujícího záření, UV záření, viditelného a infračerveného světla způsobí ještě hlubší změny ve fyzicko-chemických vlastnostech polymerů. Tuto skutečnost je třeba vzít v úvahu při hodnocení radiační odolnosti. [12]

3.4 Zlepšení vlastností plastů

Termoplasty se pomocí radiačního síťování převádí na takové termoplasty, které se ve spoustě případů chovají jako elastomery. Elastomerické vlastnosti se projevují především nad teplotou tání krystalů, respektive teplotou skelného přechodu neupraveného polymeru. Pomocí síťování odolává původně termoplastický výrobek daleko vyšším teplotám než dříve. [11]



Obr. 12 Charakteristika vlastností termoplastů v závislosti na dávce ozáření [11]

Radiační síťování mění následující mechanické vlastnosti plastů [11]:

- nárůst modulu
- zvýšení pevnosti (zejména z dlouhodobého hlediska)
- pokles poměrného prodloužení při přetržení (tažnosti)
- redukce studeného tečení – (creepu)
- nárůst tvrdosti (Shore)
- zlepšení meze únavy (při střídavém ohybu)
- zlepšení povrchové pevnosti vůči otiskům a nespojitosti vstříkovaných dílů
- zlepšení odolnosti proti vnitřnímu pnutí a redukce přenosu a růstu
- zlepšení zotavení materiálu „memoryeffect“
- zlepšení ořezuvzdornosti (podmíněně)
- zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem

U tepelných vlastností dochází v důsledku síťování k [11]:

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

K zlepšeným chemickým vlastnostem patří [11]:

- snížení rozpustnosti
- zlepšení odolnosti proti botnání
- zvýšení odolnosti proti vzniku trhlin způsobených pnutím
- zlepšení odolnosti vůči hydrolýze a zvýšená olejuvzdornost

3.5 Použití ionizačního záření v praxi

Tab. 6 Příklad vybraných aplikací v průmyslu a vlastností získaných po ozáření [11]

Aplikace	Materiál	Zlepšené vlastnosti
Palivová potrubí pro automobilový průmysl	Polyamid 6, 66, 11 a 12	Tepelná odolnost
		Odolnost proti hydrolýze
		Pevnost v tlaku
		Pevnost v tlaku
Těsnění	PE, TPE	Odolnost proti chemikáliím
		Tvarová stálost za tepla
		Tlaková zpětná deformovatelnost
		Snížené studené tečení
		Možný nárůst tvrdosti Shore
Kabely a izolace vodičů	PE, PUR, TPU, PVC	Tepelná odolnost
		Odolnost proti okujím ze svařování
		Odolnost proti chemikáliím
		Odolnost proti otěru
Hadice pro zdravotnickou techniku	PE	Sterilizovatelnost horkou párou

4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU

Testování mechanických vlastností materiálu hraje nezastupitelnou roli při kontrole jakosti, kontrole technologie výroby a při přejímkách polotovarů či výrobků a také při vývoji nových materiálů. Existuje velká spousta materiálových zkoušek, některé mají uplatnění obecně pro testování jak křehkých tak houževnatých materiálů (zkouška tvrdosti, tahová zkouška) a jiné se využívají jen ve speciálních případech. Technologické zkoušky se využívají pro posouzení vhodnosti materiálu k určitému speciálnímu způsobu zpracování (slévatelnost, svařitelnost). U některých materiálů se rovněž provádí zkoušky tlakem, ohybem, stříhem či krutem. [13]

4.1 Vlastnosti materiálu

Materiály mají nejrozmanitější vlastnosti, které jsou dány hlavně jejich chemickým složením a strukturou. V technické praxi je dělíme na vlastnosti [14]:

- Fyzikální (souvisí hlavně s krystalickou stavbou – hustota, elektrická a tepelná vodivost, magnetické vlastnosti apod.)
- Chemické (elektrochemické, korozní apod.)
- Mechanické (pružnost, pevnost, houževnatost, tvrdost, tečení, únava apod.)
- Technologické (tvárnost, slévatelnost, obrobitelnost, svařitelnost apod.)

Dle vlivu struktury [14]:

- Vlastnosti strukturně citlivé (závislé na dokonalosti krystalové mřížky, způsobu tepelného a mechanického zpracování – většina mechanických vlastností, elektrické apod)
- Vlastnosti strukturně necitlivé (hmotnost, měrné teplo, teplota tání apod.)

4.2 Mechanické zkoušky

Mechanické vlastnosti umožňují kvantitativně hodnotit chování materiálů při působení vnějších sil, případně i dalších vlivů. Některé hodnoty mají fyzikální význam – lze je tedy přepočítávat pro různé tvary a rozměry, jiné vystihují chování za určitých podmínek (které nelze převádět) pro posouzení vlastností a zpracování materiálu (vrubová houževnatost). [14]

Mechanické zkoušky můžeme dělit podle:

- Charakteru zatěžování (statické, dynamické)
- Zjišťovaných vlastností (pevnost, tvrdost, únava apod.)
- Druhu namáhání (tah, tlak, ohyb, krut apod.)
- Teploty a prostředí

Pro zabezpečení reprodukovatelnosti a porovnatelnosti je nutnost jejich normování. Způsobem odebrání vzorků můžeme podstatně ovlivnit obdržené výsledky. [14]

ČSN udává počet zkušebních vzorků dle množství a druhu výroby, potřeby bezpečnosti apod. Obecné zásady pro odběr jsou [14]:

- Reprezentace určité dávky, výroby, tavby
- Vyhnout se místům s předpokládanými vadami
- Vzorek musí prodělat celý výrobní proces
- Odběrem se nesmí ovlivnit vlastnosti
- Brát ohled na anizotropii
- Značení (nepoškozovat zkušební část, zůstat zachováno)

4.3 Provedené zkoušky

4.3.1 Stanovení pevnosti v tahu a tažnosti

ČSN EN ISO 1798

Zkouška tahem je jednou z nejdůležitějších a nejvyužívanějších statistických zkoušek v technické praxi. Princip zkoušky spočívá v zatěžování zkušebního tělesa statickým jednoosým tahem.

U plastických hmot jsou v důsledku anizotropie napětí v tahu rozložena po průřezu nerovnoměrně, což je příčinou vzniku smykových napětí.[15]

- **Princip zkoušky**

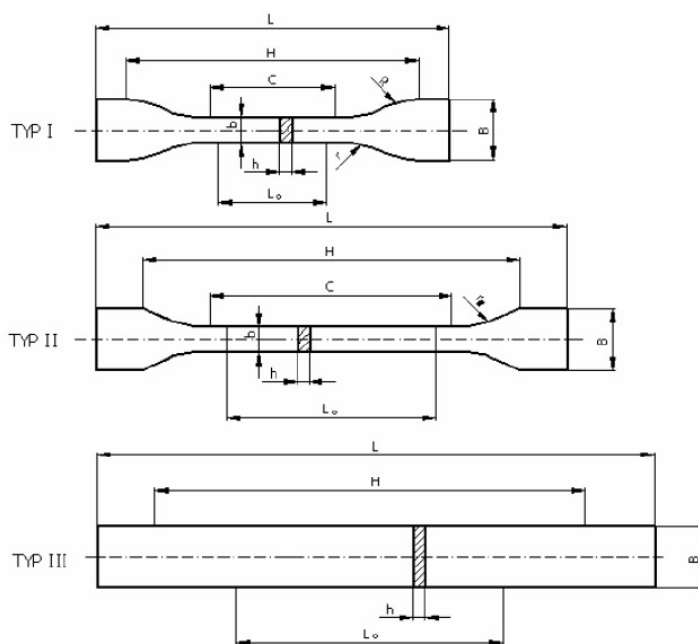
Zkušební těleso je namáháno ve směru své hlavní podélné osy. Namáhání je prováděno konstantní rychlostí do okamžiku jeho porušení, kdy napětí v tahu nebo protažení dosáhnou předem zvolené hodnoty. Při zkoušce se zaznamenává zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení.

- **Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku**

Vzorky se získávají buď tvářením na zvolený rozměr, nebo jsou zhotovena mechanickým obráběním, řezáním nebo vysekáváním z hotových výrobků nebo polotovarů, jako výlisky nebo lamináty. Typické pro tuto zkoušku jsou zkušební tělesa ve tvaru oboustranné lopatky. Metody uvádějí doporučené rozměry zkušebních těles dle normy ČSN EN ISO 527. [16]

Tab. 7 Rozměry zkušebních těles pro tahové zkoušky polymerů [16]

Rozměry [mm]	Typ zkušebního tělesa		
	Typ I	Typ II	Typ III
Celková délka L	75	150	250
Šířka upínací hlavy B	12,5±1,0	20,0±0,5	25,0±0,5
Délka pracovní části C	25±1	80,0±0,5	-
Šířka pracovní části b	4±1	10,0±0,5	-
Malý poloměr zakřivení r	8,0±0,5	-	-
Velký poloměr zakřivení R	12,5±1,0	-	-
Počáteční měřená délka L₀	20,0±0,5	50,0±0,5	50±1
Vzdálenost mezi značkami H	50±2	110±5	170±5
Poloměr zakřivení r₁	-	20-25	-
Tloušťka h	4,0±0,2	4,0±0,2	4,0±0,2



Obr. 13 Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku[16]

4.3.2 Stanovení odolnosti proti dalšímu trhání

ČSN EN ISO 8067

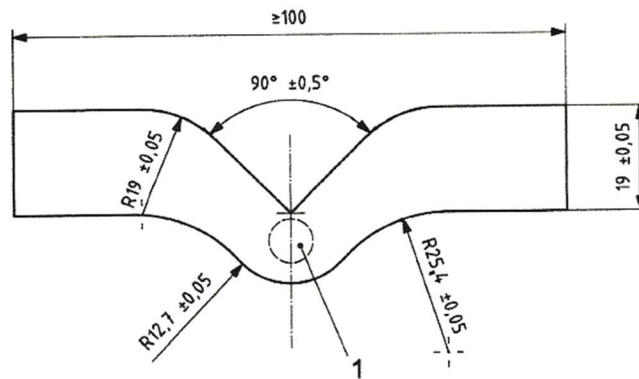
Norma uvádí dvě metody stanovení pevnosti měkkých lehčených polymerních materiálů proti dalšímu trhání. Metoda A používá zkušební těleso typu trouser, metoda B používá zkušební těleso typu angle bez zářezu. Zkouší se na tahovém trhacím stroji. Měří se síla, při které dojde k přetržení zkušebního tělesa. Uveden výpočet odolnosti proti dalšímu trhání. Z důvodu používání metody B, se dál budu věnovat jen téhle metodě. [17]

- **Princip zkoušky**

Zkušební těleso se musí upnout do čelistí zkušebního stroje. Při sevření se musí dbát na to, aby bylo zkušební těleso v čelistech dostatečně sevřeno. Zkušební těleso musí být symetricky umístěné, aby bylo napětí v průřezu rovnoměrně rozloženo. Po upnutí se zkušební stroj uvede do chodu při předem stanovené rychlosti a zaznamenává se síla. [17]

- **Zkušební tělesa**

Zkušební těleso je vyseknuté z desky o tloušťce 10mm – 15mm vysekávacím nožem o rozměrech a tvaru uvedených na obrázku.[17]



Obr. 14 Zkušební těleso typu angle pro metodu B[17]

4.3.3 Stanovení odporu proti stlačení

ČSN EN ISO 3386

Tato norma specifikuje metodu stanovení odporu proti stlačení nízkohustotních měkkých lehčených materiálů s hustotou do 250 kg/m^3 . Stanovení odporu proti stlačení je měřítkem nosných vlastností materiálu, to však nemusí být měřítkem schopnosti snést dlouhotrvající zatížení. [18]

- **Princip zkoušky**

Rozměry zkušebních těles jsou změřena způsobem uvedeným v normě ISO 1923 a vypočítá se plocha zatěžovaného povrchu. Zkušební těleso se musí umístit tak, aby zatěžující síla působila ve středu zkušebního stroje. Zkušební těleso je stlačováno stlačovací deskou, která musí přesahovat zkušební těleso ve všech směrech, rychlostí $(100 \pm 20) \text{ mm/min}$ o 70% původní tloušťky nebo se stlačuje do dosažení deformace v tlaku, které jsou uvedené v materiálové normě. Po stlačení se stejnou rychlostí deska zvedá, dokud není vzdálenost stlačovací desky a základny rovna původní tloušťce zkušebního tělesa. Tento cyklus se třikrát opakuje a při čtvrtém cyklu se odečítá síla v newtonech při předepsané deformaci. [18]

- **Zkušební těleso**

Zkušební těleso musí být pravouhle rovnoběžné nebo válcového tvaru. Upřednostňovaná tloušťka tělesa je $(50 \pm 1) \text{ mm}$, avšak nesmí být menší jak 10 mm. V případě že je tloušťka menší jak 10 mm, musí se materiály vrstvit. Plocha zkušebního tělesa musí přesahovat 2500 mm^2 . V žádném případě nesmí zkušební těleso přesahovat stlačovací desku. [18]

4.3.4 Stanovení trvalé deformace v tlaku

ČSN EN ISO 1856

Tato norma specifikuje tři metody stanovení trvalé deformace v tlaku měkkých lehčených materiálů. Specifikována je pouze metoda A, jelikož tato metoda byla při měření využívána. [19]

- **Princip zkoušky**

Po kondicionování zkušební tělesa ve specifikovaných podmínkách, musí být změřena počáteční tloušťka zkušební tělesa podle normy ISO 1923. Po zaznamenání počáteční tloušťky se těleso vkládá mezi desky stlačovacího zařízení. Stlačí se buď na 50% nebo 75% jeho počáteční tloušťky a ponechá se v tomto stavu. Do 15 min musí být vzorky vloženy do sušárny na 22 hodin při teplotě $(70\pm 1)^{\circ}\text{C}$. Po uplynutí této doby musí být vzorky vytaženy ze sušárny a do 1 minuty uvolněny z přístroje, kterým byly stlačovány. Vzorky se musí položit na desku s nízkou tepelnou vodivostí. Po dobu 30 min jsou nechána zkušební tělesa při stejné teplotě, jako byla teplota kondicionování. Na závěr zkoušky jsou vzorky změřeny a je provedený výpočet odpor proti stlačení. [19]

- **Zkušební těleso**

Zkušební tělesa musí mít horní a dolní plochy rovnoběžné a strany přesně kolmé. Zkušební těleso musí být o rozměrech 50x50x25 mm. [19]

4.3.5 Trvalá deformace při cyklickém namáhání

ČSN EN ISO 7214

- **Princip zkoušky**

Zkušební vzorky jsou poměřeny podle normy ISO 1923. Po změření se vloží mezi desky stlačovacího zařízení. Vzorky jsou stlačeny 80 000 cykly bez přestání do 25% původní tloušťky. Stlačování probíhá rychlostí 60 stlačení/min. [20]

- **Zkušební těleso**

Zkušební těleso má mít délku (50 ± 5) mm, šířku (50 ± 5) mm a tloušťku (25 ± 2) mm. [20]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Hlavním úkolem této práce bylo zjistit mechanické vlastnosti lehčeného PE, pro zjištění využitelnosti tohoto materiálu pro nábytkářský průmysl. Dále byly zjišťovány rozdíly těchto materiálů v závislosti na modifikaci. Vzorky byly porovnávány tři – neozářený lehčený PE a dva ozářené.

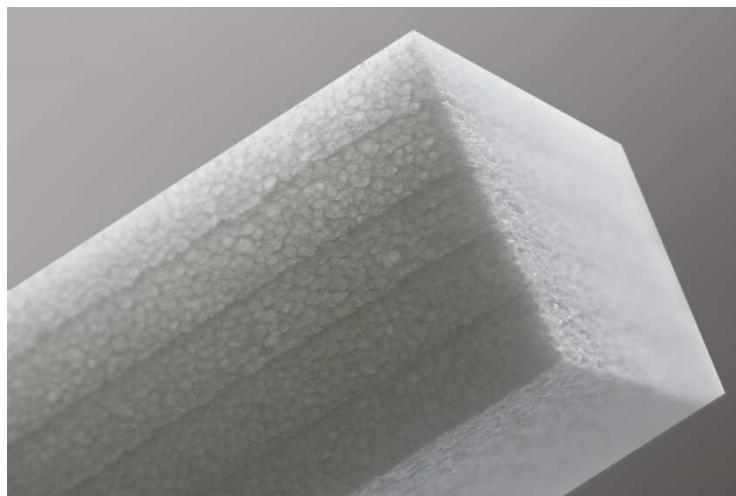
Ze začátku se stanovilo, jaké vlastnosti by bylo vhodné sledovat. Vybráno bylo pět zkoušek (Stanovení pevnosti v tahu a tažnosti ČSN EN ISO 1798, Stanovení odolnosti proti dalšímu trhání ČSN EN ISO 8067, Stanovení odporu proti stlačení ČSN EN ISO 3386, Stanovení trvalé deformace v tlaku ČSN EN ISO 1856, Trvalá deformace při cyklickém namáhání ČSN EN ISO 7214).

Desky lehčeného PE se nechaly ozářit ve firmě BGS zářením urychlených elektronů dávkami 99 a 165kGy.

Naměřená data byla graficky znázorněna a vyhodnocena.

6 POUŽITÉ MATERIÁLY

Pro diplomovou práci byl využit materiál – pěnový polyetylen EPE. Přesné složení použitých přísad není po dohodě s výrobcem přesně publikováno. Část materiálů bylo ozářeno elektronovým beta zářením. Výhodou tohoto materiálu je, že tlumí nárazy, zajišťuje fixaci zboží v kartonu a chrání proti poškrábání a znečištění. Hlavní využití má tento materiál jako obalový a fixační materiál v různých odvětvích zpracovatelského průmyslu. Desky z tohoto materiálu vynikají vysokou pevností a jsou vhodné pro technicky náročné aplikace. [21]



Obr. 15 Pěnový polyetylen EPE [21]

7 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

V této kapitole jsou popsány stroje a zařízení, které byly využity pro vypracování této diplomové práce.

7.1 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

Pomocí tohoto zařízení se provádí zkouška tahem, tlakem a ohybem. K ovládní stroje, ukládání a vyhodnocování dat získaných ze zkoušek slouží osobní počítač, který je součástí stroje. V počítači je software Test Xpert. Stroj je vybaven temperační komorou, která se využívá pro zkoušky za zvýšené nebo snížené teploty.

Hmotnost stroje je 150 kg. Maximální zkušební síla dosahuje 20 kN. Maximální rychlost posuvu příčnicku je 750 mm/min.



Obr. 16 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

7.2 Zkušební stroj Instron 8871

Je to servo-hydraulický testovací stroj pro cyklické namáhání. Stroj má základnu s T – drážkou a využívá se pro širokou škálu statických a dynamických zkoušek. Maximální osový rozsah síly je ± 10 kN. Stroj nám poskytuje přesné testování dat s cyklickým opakováním. Stroj umožňuje měření jak v nízkých tak i vysokých teplotách nebo i v kapalině.

Hydraulický tlak stroje je 207 barů.

Nosnost rámu 10 kN a tuhost 260 kN/mm.

Zdvih stroje dosahuje 717 mm.

Hmotnost rámu je 287 kg. [22]



Obr. 17 Zkušební stroj Instron 8871

7.3 Mechanický vysekávací lis

Tento stroj je běžně využíván pro oddělování různých dílců z usně. Pomocí vysekávací raznice oddělí z materiálu zkušební vzorek.



Obr. 18 Mechanický vysekávací lis

7.4 Vřetenový lis

V případech kdy se nedal využít vysekávací lis, byl využit ruční vřetenový lis.



Obr. 19 Ruční vřetenový lis

8 POPIS PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH TĚLES

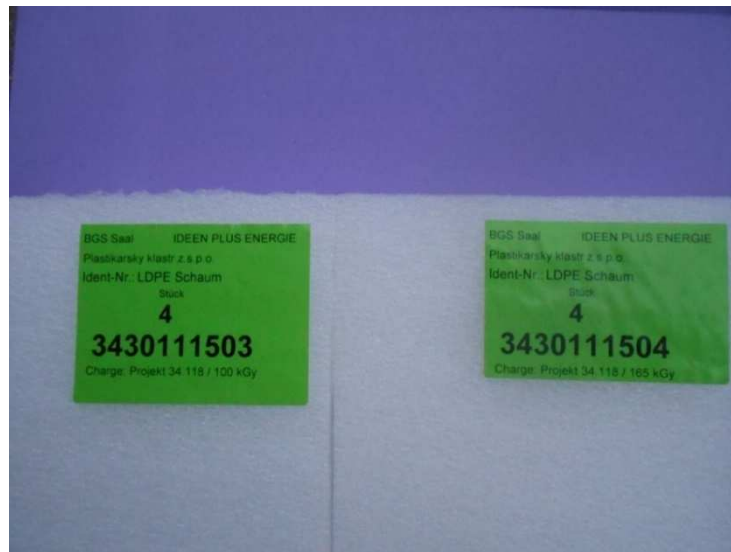
Zkušební tělesa byly zhotoveny vyřezáváním a vysekáváním z bloku pěnového EPE. Vzorky byly zhotoveny pomocí mechanického vysekávacího lisu, ručního vřetenového lisu a skalpelu.

8.1 Sítování zkušebních těles

Zkušební tělesa byla ozářena elektronovým beta zářením o energii 10 MeV. Ozařování probíhalo v německé firmě BGS Beta-Gama-ServiseGmbH & Co. Vzorky byly ozařovány dávkami záření odpovídající 99 a 165 kGy. Samotné ozařování probíhalo pomocí opakovaného průjezdu ozařovací komorou. Při jednom průjezdu ozařovací komorou nemůže na těleso působit více než 33 kGy, při vyšší dávce by mohlo dojít k degradaci materiálu. Proto se komorou projíždí tolikrát, dokud nedosáhneme požadované dávky záření.



Obr. 20 Ozařovací linka firmy BGS



Obr. 21 Ozářené desky polyethylenu a jejich označení

8.2 Tvary zkušebních těles

Tvary zkušebních těles se lišily podle druhu prováděné zkoušky.

8.2.1 Stanovení pevnosti v tahu a tažnosti

Pro stanovení pevnosti v tahu a tažnosti byly vyrobeny tělíška ve tvaru oboustranných lopatek (byl zvolen typ II - dle tabulky 7). Zkušební tělesa byla získána vyseknutím pomocí vysekávací raznice. Jelikož byly zkušební vzorky vyráběny z desek o tloušťce 50 mm, musel se materiál před vysekáváním rozřezat. Požadovaná tloušťka pro tuhle zkoušku byla 10 mm.



Obr. 22 Zkušební těleso pro tahovou zkoušku

8.2.2 Stanovení odolnosti proti dalšímu trhání

Zkušební tělesa pro tuto zkoušku byla vyrobena pomocí vysekávací raznice. Materiál se musel nejdříve rozříznout na požadovanou tloušťku 10mm.



Obr. 23 Zkušební těleso pro zkoušku odolnosti proti dalšímu trhání

8.2.3 Ostatní zkoušky

Zkušební vzorky pro ostatní zkoušky byly ve stejném tvaru. Jednalo se o krychle o hraně 50x50x50 mm. Tyhle krychle byly vyřezány z desky pomocí skalpelu.



Obr. 24 Zkušební těleso pro ostatní typy zkoušek

9 TAHOVÁ ZKOUŠKA

Pro zkoušku tahem byl zvolen stroj ZWICK ROELL 1456 dle normy ČSN EN ISO 1798. Pomocí zkoušky byl srovnáván jeden materiál ve třech stupních ozáření (0, 99 a 165 kGy), při pokojové teplotě +23°C. Vyseknutá zkušební tělesa se nechala před zkoušením kondicionovat 24 hodin při pokojové teplotě. Pro každý materiál bylo vyrobeno 10 vzorků, které byly poměřeny (každý rozměr 5x), podle normy ČSN EN ISO 1923. Vzorky byly vyrobeny na tloušťku ± 10 mm.

Nejprve bylo zkušební těleso upnuto do stroje, do doby než bylo dosaženo „předzatížení“ 2N, byla rychlost posuvu 100 mm/min. Při překročení této hodnoty byl stroj přepnut na rychlost posuvu 500 mm/min a začalo konkrétní měření. „Předzatížení“ se provádělo z důvodu narovnání zkušebního tělesa.

K trhacímu stroji patří počítač, kde se ukládají vstupní data každého měřeného vzorku. V průběhu zkoušky se ukládají naměřené hodnoty a rovnou se vytváří diagram tahové zkoušky.

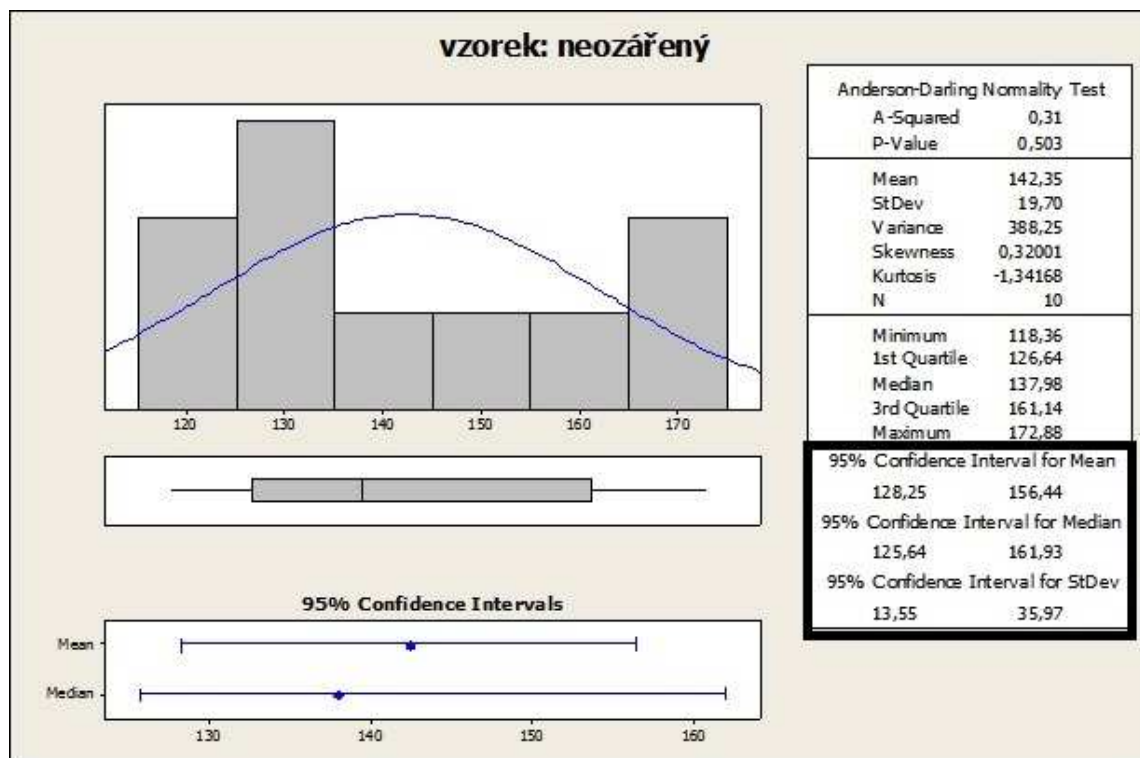
9.1 Naměřené data

9.1.1 Pevnost v tahu TS [kPa]

- NEOZÁŘENÝ VZOREK

Tab. 8 Naměřené hodnoty pro pevnost v tahu

rozměry vzorku	a [mm]	b [mm]	S[mm]	F [N]	TS[kPa]
1	10,67	10,64	113,53	16,30	143,57
2	10,40	10,64	110,66	14,40	130,13
3	10,64	10,64	113,21	18,00	159,00
4	10,90	10,64	115,98	15,00	129,33
5	10,71	10,64	113,95	19,70	172,88
6	11,05	10,64	117,57	19,70	167,56
7	10,84	10,64	115,34	17,50	151,73
8	11,02	10,64	117,25	13,90	118,55
9	10,64	10,64	113,21	13,40	118,36
10	10,01	10,64	106,51	14,10	132,38



Obr. 25 Výsledky pro pevnost v tahu

Bylo určeno, že s pravděpodobností 95% bude:

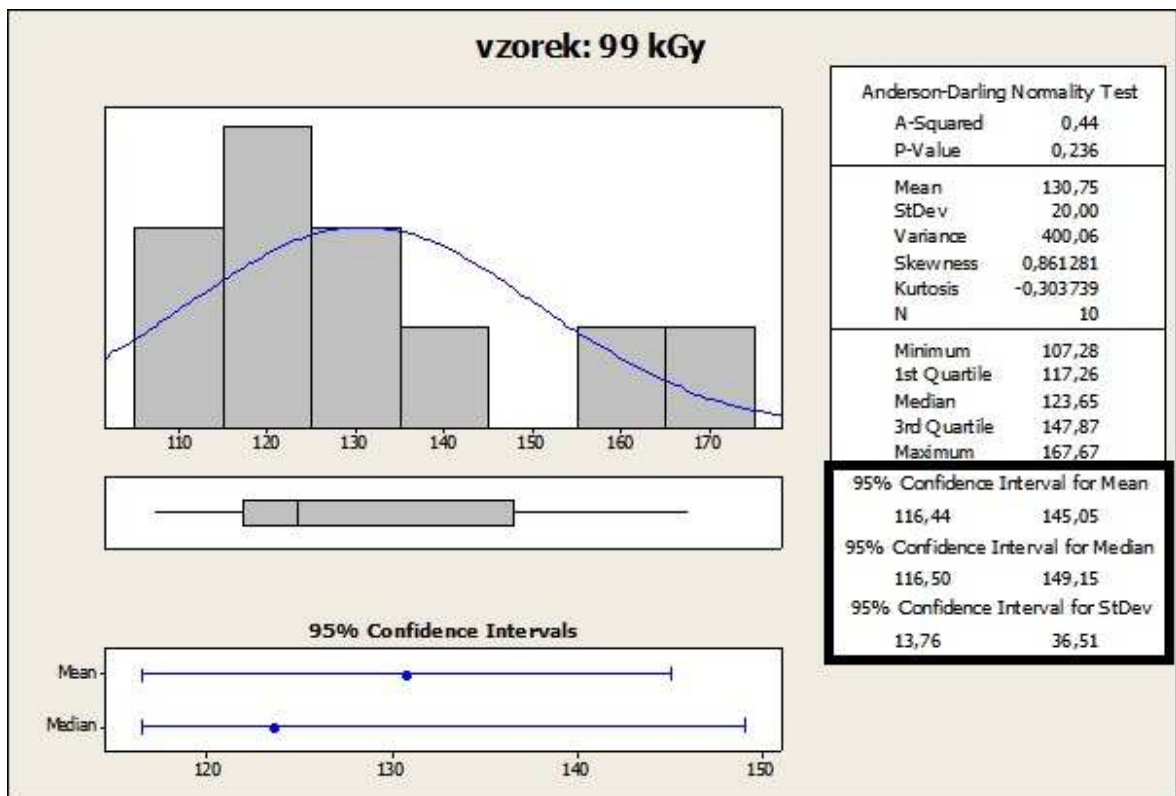
Tab. 9 Vypočítané hodnoty

	OD[kPa]	DO[kPa]
μ	128,25	156,44
Median	125,64	161,93
σ	13,55	35,97

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 99 kGy

Tab. 10 Naměřené hodnoty pro pevnost v tahu

rozměry vzorku	a [mm]	b [mm]	S[mm]	F [N]	TS[kPa]
1	11,00	10,64	117,04	14,80	126,45
2	10,74	10,64	114,27	16,50	144,39
3	10,65	10,64	113,32	19,00	167,67
4	10,32	10,64	109,80	12,20	111,11
5	11,34	10,64	120,66	19,10	158,30
6	11,51	10,64	122,47	14,80	120,85
7	10,25	10,64	109,06	11,70	107,28
8	10,15	10,64	108,00	13,00	120,37
9	10,32	10,64	109,80	13,10	119,31
10	10,63	10,64	113,10	14,90	131,74



Obr. 26 Výsledky pro pevnost v tahu

Bylo určeno, že s pravděpodobností 95% bude:

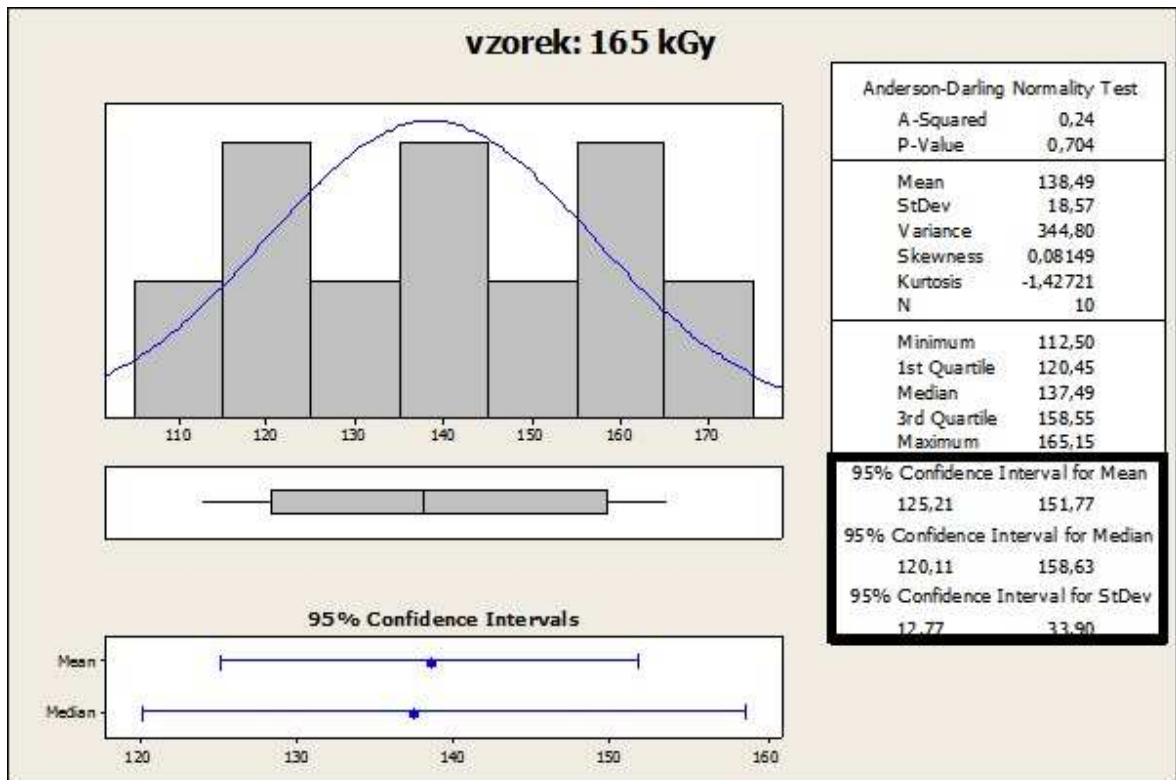
Tab. 11 Vypočítané hodnoty

	OD[kPa]	DO[kPa]
μ	116,44	145,05
Median	116,50	149,15
σ	13,76	36,51

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 165 kGy

Tab. 12 Naměřené hodnoty pro pevnost v tahu

rozměry vzorku	a [mm]	b [mm]	S[mm]	F [N]	TS[kPa]
1	10,21	10,64	108,63	15,10	139,00
2	10,30	10,64	109,59	13,30	121,36
3	10,06	10,64	107,04	12,60	117,71
4	11,33	10,64	120,55	17,70	146,83
5	11,04	10,64	117,47	18,60	158,34
6	10,87	10,64	115,66	14,90	128,83
7	11,04	10,64	117,47	19,40	165,15
8	10,61	10,64	112,89	12,70	112,50
9	11,04	10,64	117,47	18,70	159,19
10	10,99	10,64	116,93	15,90	135,98



Obr. 27 Výsledky pro pevnost v tahu

Bylo určeno, že s pravděpodobností 95% bude:

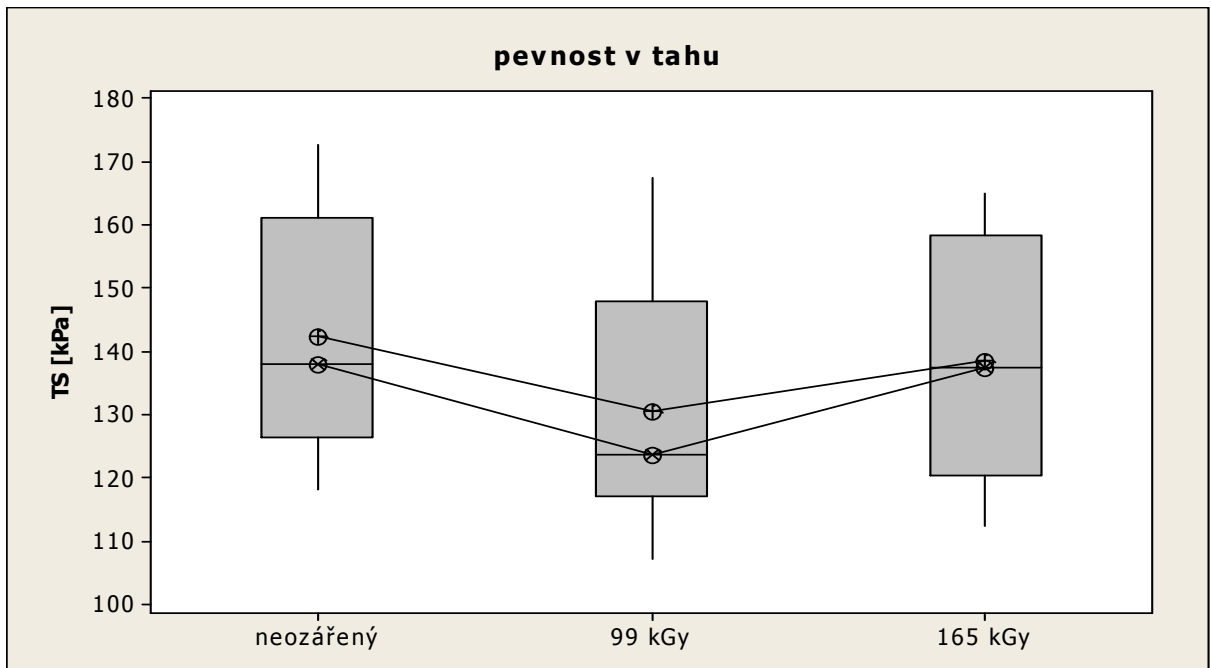
Tab. 13 Vypočítané hodnoty

	OD[kPa]	DO[kPa]
μ	125,21	151,77
Median	120,11	158,63
σ	12,77	33,90

- SROVNÁNÍ VŠECH VZORKŮ

Tab. 14 Srovnání vzorků pro pevnost v tahu

	TS[kPa]	F{lo max}[N]
0 kGy	142,35	16,20
99 kGy	130,75	14,91
165 kGy	138,49	15,89



Obr. 28 Srovnání výsledků pro tahovou zkoušku

Tab. 15 Procentuální srovnání naměřených výsledků

	0 kGy	99 kGy	165 kGy
\bar{X}	100 %	91,85%	92,29%
\tilde{X}	100 %	89,62%	99,65%

ANOVA

$$H_0: \mu_{\text{neoz.}} = \mu_{99 \text{ kGy}} = \mu_{165 \text{ kGy}}$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1-\alpha = 0,95$$

$$p = 0,409 > 0,05$$

Statistická interpretace: S pravděpodobností $1-\alpha = 0,95$ nemohu zamítnout H_0 .

Technická interpretace: Nemohu zamítnout s pravděpodobností 95%, že se aritmetické průměry pevnosti v tahu se od sebe liší významně.

KRUSKAL WALLIS

$$H_0: \mu_{\text{neoz.}} = \mu_{99 \text{ kGy}} = \mu_{165 \text{ kGy}}$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1-\alpha = 0,95$$

$$p = 0,385 > 0,05$$

Statistická interpretace: S pravděpodobností $1-\alpha = 0,95$ nemohu zamítnout H_0 .

Technická interpretace: Nemohu zamítnout s pravděpodobností 95%, že se aritmetické průměry pevnosti v tahu se od sebe liší významně.

Pilotní počet vzorků (velikost vybraného souboru) byl zvolen $n=10$ z důvodu nákladů spojených s velikostí vzorků dodávaných do BGS k radiačnímu sítování.

Protože nedošlo k zamítnutí nulové hypotézy, bylo by vhodné zvýšit velikost výběrového souboru min o 300 % ($n=30$) a testy opakovat.

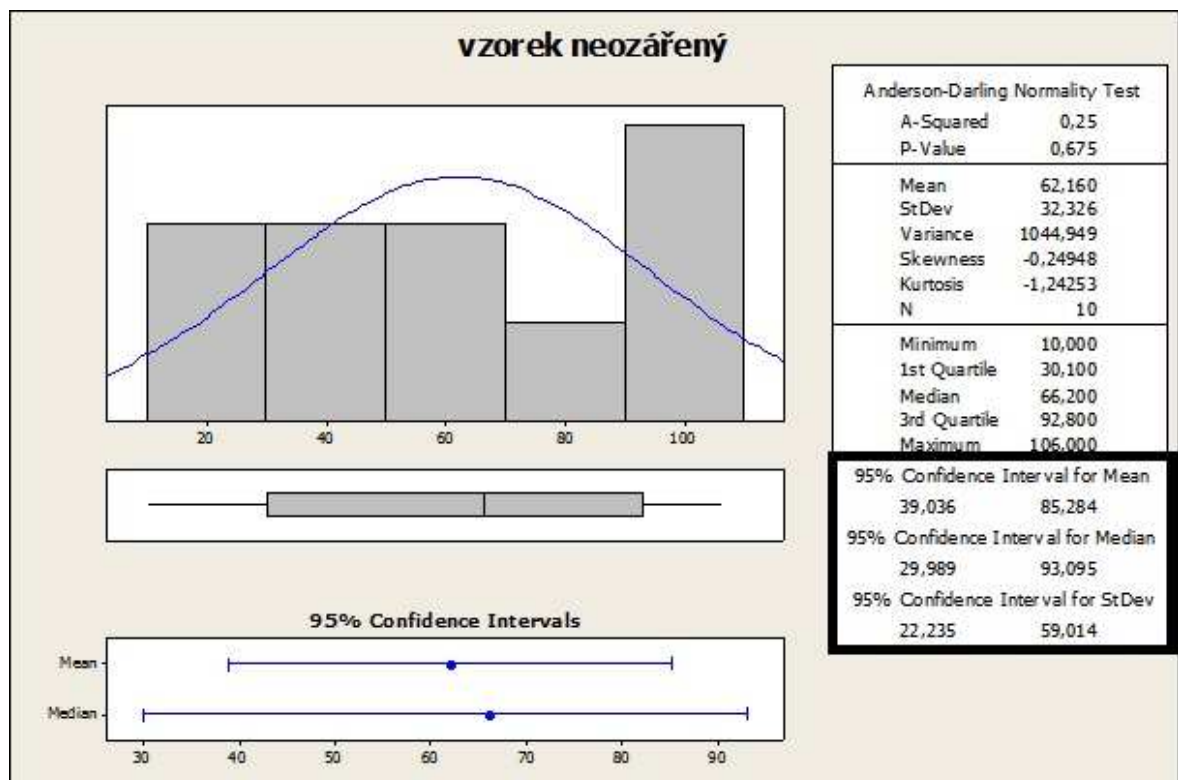
Stanovením pevnosti v tahu nebyl prokázán téměř žádný vliv, který by byl statisticky významný a fyzikálně postižitelný. Kvalitnějších výsledků lze dosáhnout pouze rozšířením série vzorků a širším spektrem vstupních parametrů.

9.1.2 Tažnost Eb [%]

- NEOZÁŘENÝ VZOREK

Tab. 16 Naměřené hodnoty

rozměry vzorku	a [mm]	b [mm]	S[mm]	F [N]	Eb [%]
1	10,67	10,64	113,53	16,30	29,20
2	10,40	10,64	110,66	14,40	67,20
3	10,64	10,64	113,21	18,00	81,20
4	10,90	10,64	115,98	15,00	30,40
5	10,71	10,64	113,95	19,70	92,00
6	11,05	10,64	117,57	19,70	106,00
7	10,84	10,64	115,34	17,50	45,20
8	11,02	10,64	117,25	13,90	10,00
9	10,64	10,64	113,21	13,40	65,20
10	10,01	10,64	106,51	14,10	95,20



Obr. 29 Výsledky pro zkoušku tažnosti

Bylo určeno, že s pravděpodobností 95% bude:

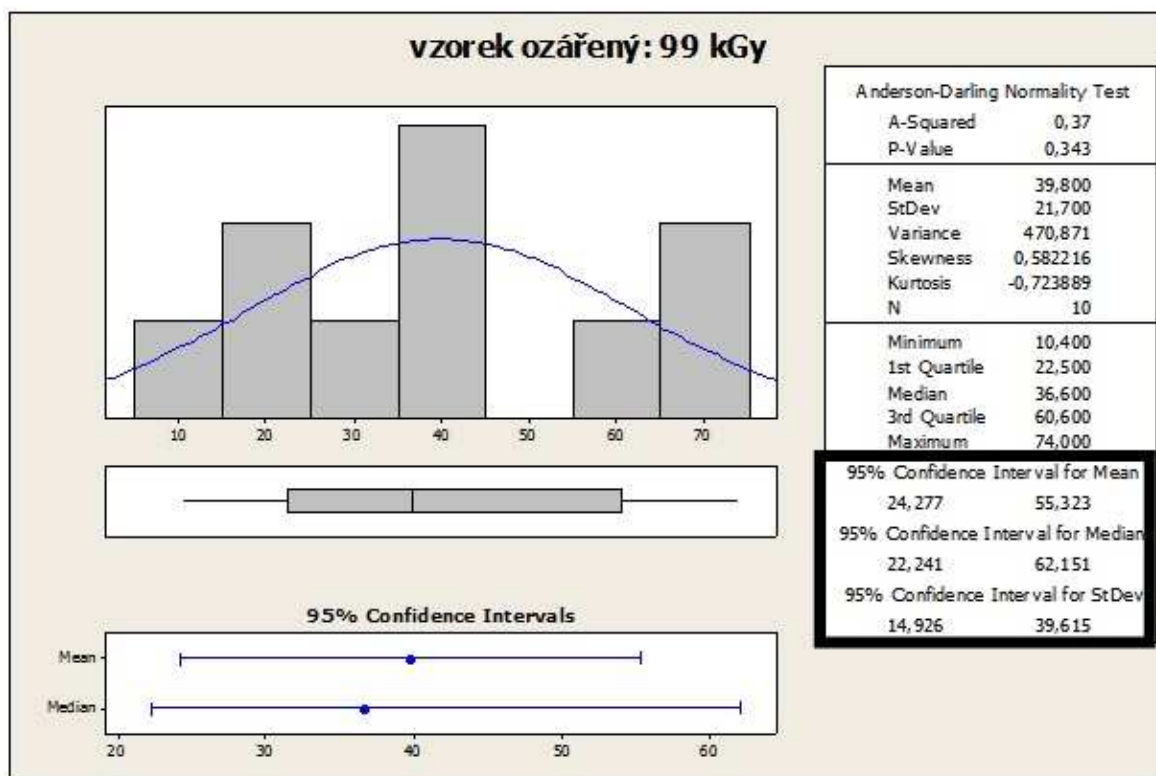
Tab. 17 Vypočítané hodnoty

	OD[%]	DO[%]
μ	39,04	85,29
Median	29,99	93,01
σ	22,24	59,02

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 99 kGy

Tab. 18 Naměřené hodnoty

rozměry vzorku	a [mm]	b [mm]	S[mm]	F [N]	Eb [%]
1	11,00	10,64	117,04	14,80	23,20
2	10,74	10,64	114,27	16,50	37,20
3	10,65	10,64	113,32	19,00	73,20
4	10,32	10,64	109,80	12,20	10,40
5	11,34	10,64	120,66	19,10	36,00
6	11,51	10,64	122,47	14,80	20,40
7	10,25	10,64	109,06	11,70	28,00
8	10,15	10,64	108,00	13,00	56,40
9	10,32	10,64	109,80	13,10	39,20
10	10,63	10,64	113,10	14,90	74,00



Obr. 30 Výsledky pro zkoušku tažnosti

Bylo určeno, že s pravděpodobností 95% bude:

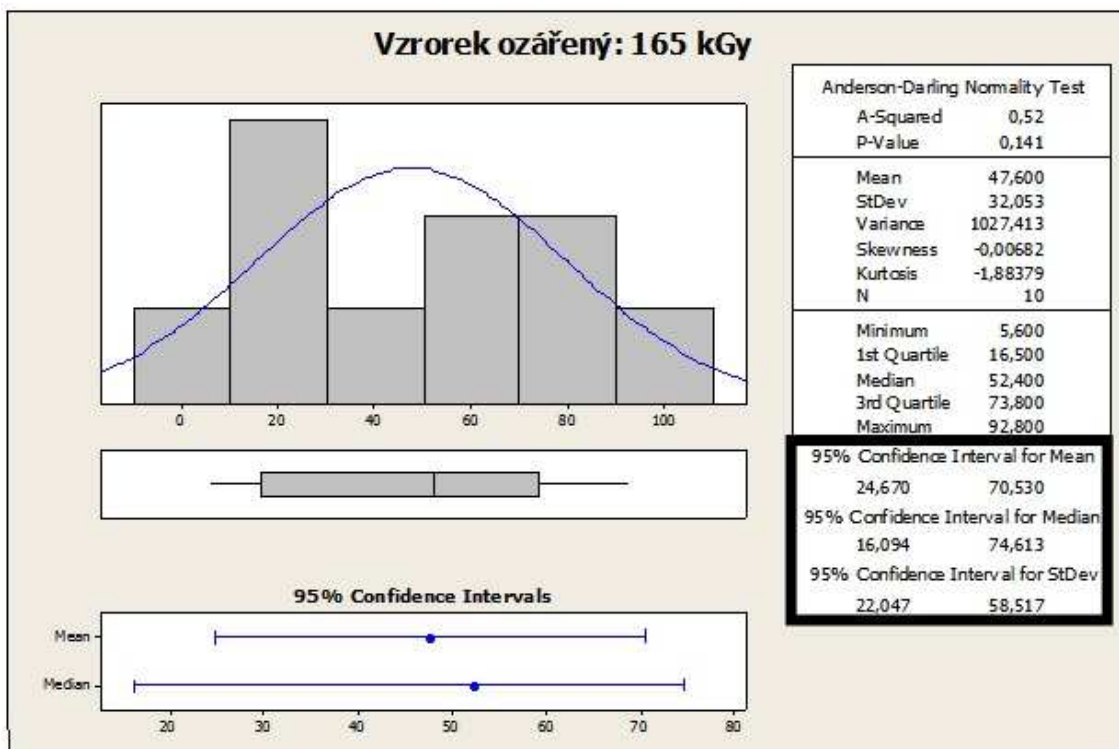
Tab. 19 Vypočítané hodnoty

	OD[%]	DO[%]
μ	24,28	55,32
Median	22,24	62,15
σ	14,93	39,63

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 165 kGy

Tab. 20 Naměřené hodnoty

rozměry vzorku	a [mm]	b [mm]	S[mm]	F [N]	Eb [%]
1	10,21	10,64	108,63	15,10	36,40
2	10,30	10,64	109,59	13,30	13,20
3	10,06	10,64	107,04	12,60	68,40
4	11,33	10,64	120,55	17,70	17,60
5	11,04	10,64	117,47	18,60	80,40
6	10,87	10,64	115,66	14,90	68,80
7	11,04	10,64	117,47	19,40	92,80
8	10,61	10,64	112,89	12,70	5,60
9	11,04	10,64	117,47	18,70	71,60
10	10,99	10,64	116,93	15,90	21,20



Obr. 31 Výsledky pro zkoušku tažnosti

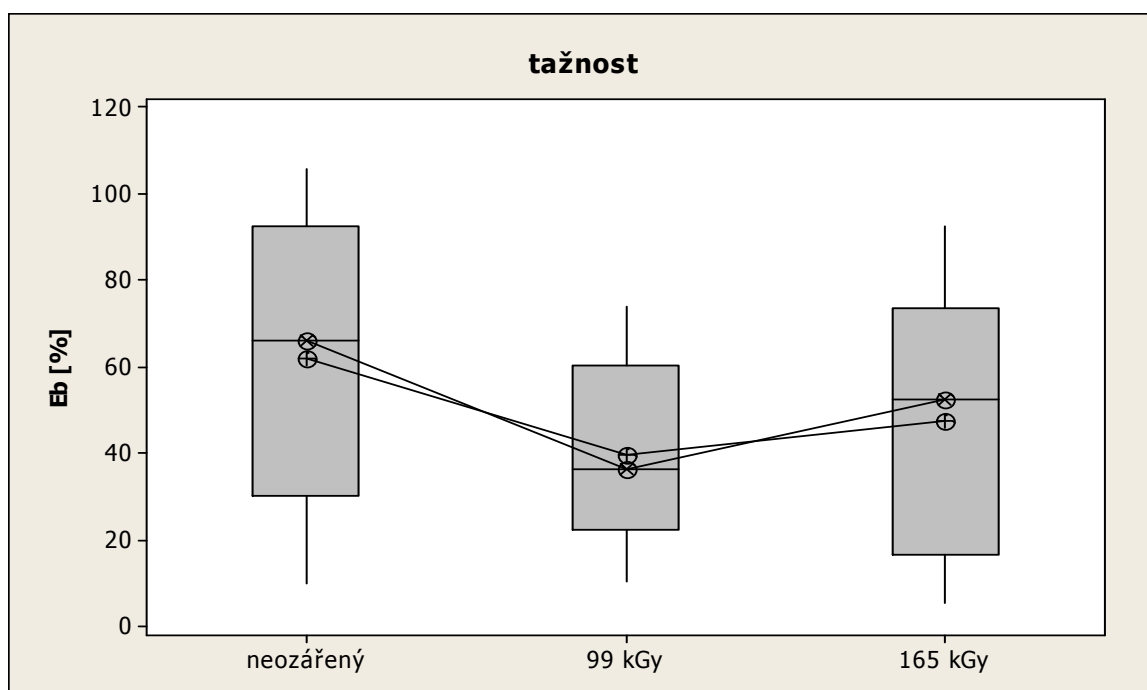
Bylo určeno, že s pravděpodobností 95% bude:

Tab. 21 Vypočítané hodnoty

	OD[%]	DO[%]
μ	24,67	70,53
Median	16,09	74,61
σ	22,05	58,52

- SROVNÁNÍ VŠECH VZORKŮ

	Eb [%]	F{lo max}[N]
0 kGy	62.16	16,20
99 kGy	39.80	14.91
165 kGy	47.60	15.89



Obr. 32 Srovnání vzorků pro zkoušku tažnosti

Tab. 22 Procentuální srovnání naměřených výsledků

	0 kGy	99 kGy	165 kGy
\bar{X}	100 %	63,99%	76,53%
\tilde{X}	100 %	55,29%	79,15%

ANOVA

$H_0: \mu_{\text{neoz.}} = \mu_{99 \text{ kGy}} = \mu_{165 \text{ kGy}}$

$H_A: \text{NON}$

$1-\alpha = 0,95$

$p = 0,237 > 0,05$

Statistická interpretace: S pravděpodobností $1-\alpha = 0,95$ nemohu zamítnout H_0 .

Technická interpretace: Nemohu zamítnout s pravděpodobností 95%, že se aritmetické průměry tažností se od sebe liší významně.

KRUSKAL WALLIS

$H_0: \mu_{\text{neoz.}} = \mu_{99 \text{ kGy}} = \mu_{165 \text{ kGy}}$

$H_A: \text{NON}$

$1-\alpha = 0,95$

$p = 0,324 > 0,05$

Statistická interpretace: S pravděpodobností $1-\alpha = 0,95$ nemohu zamítnout H_0 .

Technická interpretace: Nemohu zamítnout s pravděpodobností 95%, že se aritmetické průměry pevnosti v tahu se od sebe liší významně.

Pilotní počet vzorků (velikost vybraného souboru) byl zvolen $n=10$ z důvodu z důvodu nákladů spojených s velikostí vzorků dodávaných do BGS k radiačnímu sít'ování.

Protože nedošlo k zamítnutí nulové hypotézy doporučuji zvýšit velikost výběrového souboru min o 300 % ($n=30$) a testy opakovat.

Hodnocením tažnosti vzorků byl prokázán viditelný vliv ozáření (míry zesítnění) na snížení tažnosti – toto bylo očekáváno. Statisticky ovšem nevýznamné a nutno zvýšit velikost výběrového souboru.

10 ODOLNOST PROTI DALŠÍMU TRHÁNÍ

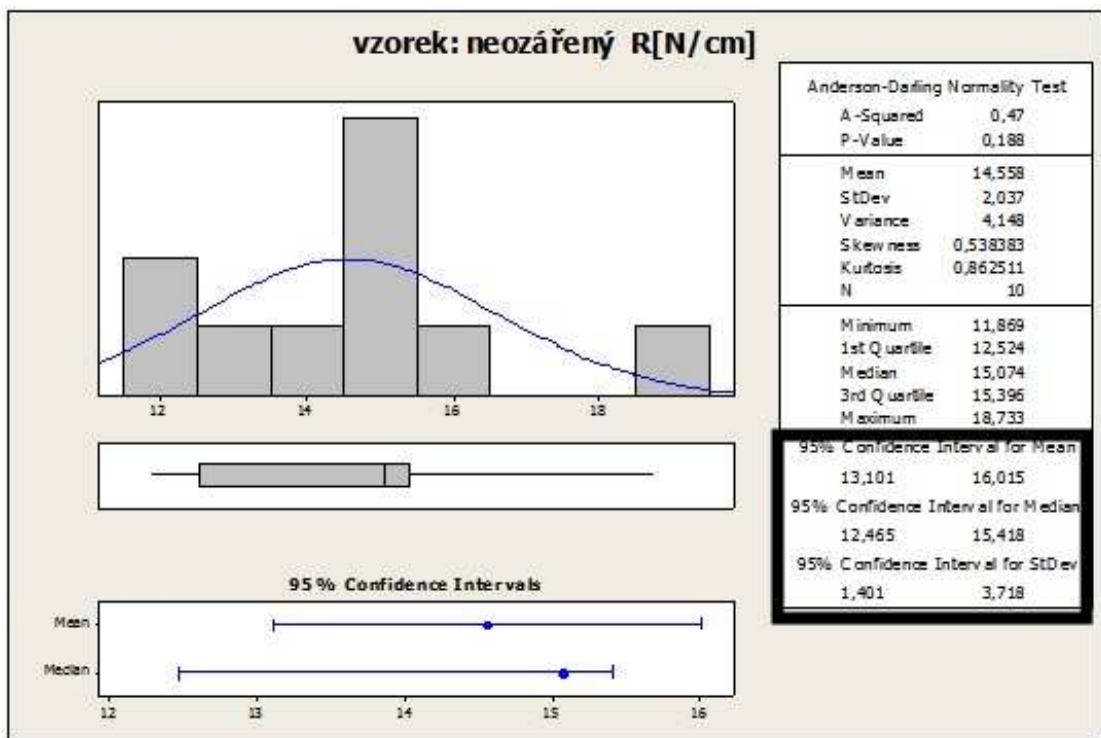
Pro zkoušku byl zvolen stroj ZWICK ROELL 1456 dle normy ČSN EN ISO 8067. Pomocí zkoušky byl srovnáván jeden materiál ve třech stupních ozáření (0, 99 a 165 kGy), při pokojové teplotě +23°C. Vyseknutá zkušební tělesa se nechala před zkoušením kondicionovat 24 hodin při pokojové teplotě. Pro každý materiál bylo vyrobeno 10 vzorků, které byly poměřeny (každý rozměr 5x), podle normy ČSN EN ISO 1923. Vzorky byly vyrobeny na tloušťku 10 mm.

Nejprve bylo zkušební těleso upnuto do stroje. Při upínání bylo důležité, dbát na pevné a symetrické upnutí do čelistí. Měření probíhalo při rychlosti posuvu 50 mm/min a pomocí počítače se zaznamenávala maximální síla při přetržení.

- NEOZÁŘENÝ VZOREK

Tab. 23 Naměřené hodnoty

Číslov zorku	R[N/cm]	Fmax[N]
1	18,73	18,80
2	12,05	12,30
3	15,02	15,20
4	15,34	15,80
5	15,17	16,00
6	15,13	15,80
7	14,02	14,20
8	15,57	16,90
9	12,68	13,30
10	11,87	12,60



Obr. 33 Výsledky pro zkoušku odolnosti proti dalšímu trhání

Bylo určeno, že s pravděpodobností 95% bude:

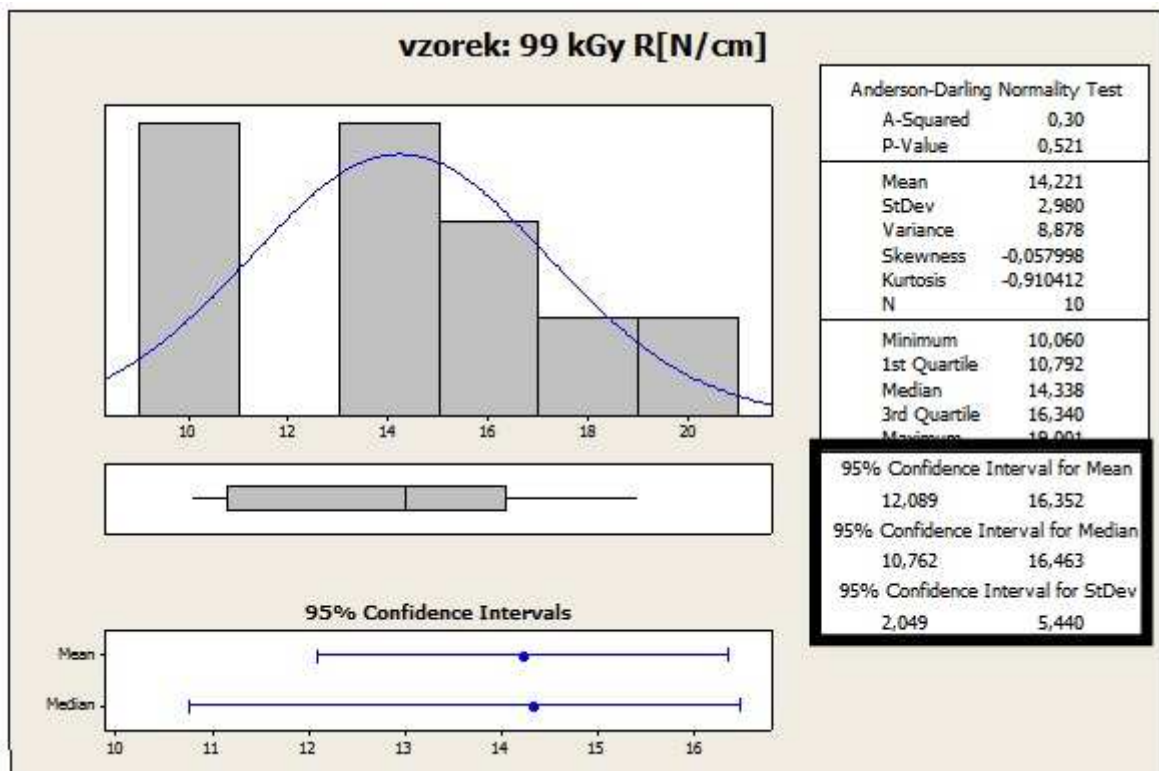
Tab. 24 Vypočítané hodnoty

	OD[N/cm]	DO[N/cm]
μ	13,10	16,02
Median	12,47	15,42
σ	1,40	3,72

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 99 kGy

Tab. 25 Naměřené hodnoty

Číslo vzorku	R[N/cm]	Fmax[N]
1	14,22	14,30
2	14,46	15,80
3	16,01	18,40
4	19,00	21,00
5	17,34	20,30
6	10,87	11,60
7	10,55	10,80
8	14,06	16,20
9	15,65	19,30
10	10,06	10,10



Obr. 34 Výsledky pro zkoušku odolnosti proti dalšímu trhání

Bylo určeno, že s pravděpodobností 95% bude:

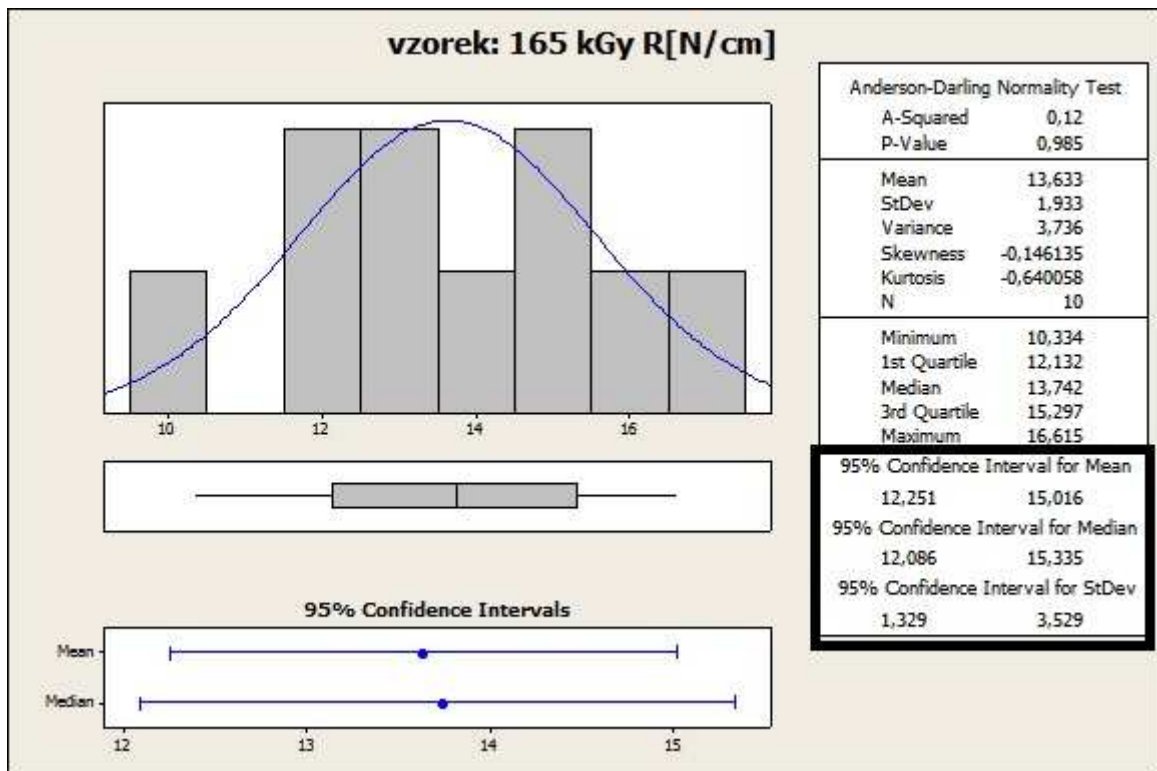
Tab. 26 Vypočítané hodnoty

	OD[N/cm]	DO[N/cm]
μ	12,09	16,35
Median	10,76	16,46
σ	2,05	5,44

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 165 kGy

Tab. 27 Naměřené hodnoty

Číslo vzorku	R[N/cm]	Fmax[N]
1	12,57	13,00
2	13,44	15,60
3	12,26	14,30
4	15,19	16,10
5	16,62	17,30
6	14,51	14,60
7	14,04	14,600
8	15,61	16,80
9	11,76	12,00
10	10,34	10,40



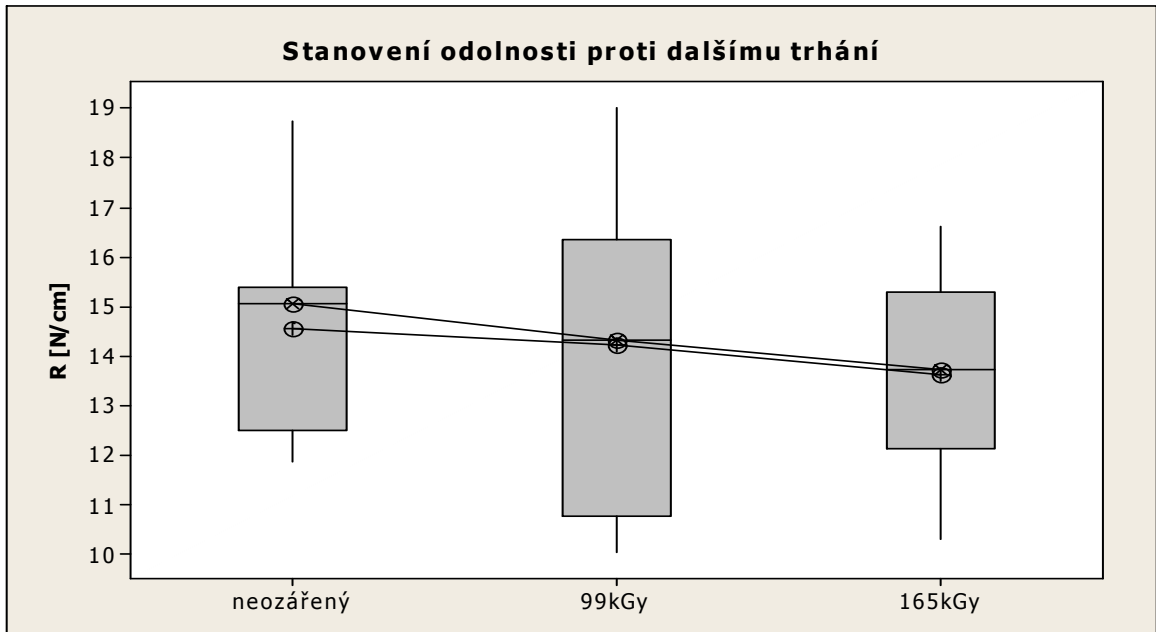
Obr. 35 Výsledky pro zkoušku odolnosti proti dalšímu trhání

Bylo určeno, že s pravděpodobností 95% bude:

Tab. 28 Vypočítané hodnoty

	OD[N/cm]	DO[N/cm]
μ	12,25	15,02
Median	12,09	15,34
σ	1,33	3,53

- SROVNÁNÍ VŠECH VZORKŮ



Obr. 36 Srovnání vzorků pro zkoušku: Stanovení odolnosti proti dalšímu trhání

Tab. 29 Procentuální srovnání naměřených výsledků

	0 kGy	99 kGy	165 kGy
\bar{X}	100 %	97,69 %	93,65 %
\tilde{X}	100 %	95,12 %	91,16 %

ANOVA

$$H_0: \mu_{\text{neoz.}} = \mu_{99 \text{ kGy}} = \mu_{165 \text{ kGy}}$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1-\alpha = 0,95$$

$$p = 0,680 > 0,05$$

Statistická interpretace: S pravděpodobností $1-\alpha = 0,95$ nemohu zamítnout H_0 .

Technická interpretace: Nemohu zamítnout s pravděpodobností 95%, že se aritmetické průměry pevnosti v tahu se od sebe liší významně.

KruskalWallis

$$H_0: \mu_{\text{neoz}} = \mu_{99 \text{ kGy}} = \mu_{165 \text{ kGy}}$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1-\alpha = 0,95$$

$$p = 0,727 > 0,05$$

Statistická interpretace: S pravděpodobností $1-\alpha = 0,95$ nemohu zamítnout H_0 .

Technická interpretace: Nemohu zamítnout s pravděpodobností 95%, že se aritmetické průměry odolnosti proti dalšímu trhání se od sebe liší významně.

Pilotní počet vzorků (velikost vybraného souboru) byl zvolen $n=10$ z důvodu nákladů spojených s velikostí vzorků dodávaných do firmy BGS k radiačnímu síťování.

Protože nedošlo k zamítnutí nulové hypotézy doporučuji zvýšit velikost výběrového souboru min o 300 % ($n=30$) a testy opakovat.

Stanovení odolnosti proti dalšímu trhání ukázalo, že se tato odolnost s mírou ozáření (zesíťování) snižuje. Toto je zcela neočekávaný výsledek a nekoresponduje s teoretickými předpoklady. Statisticky nevýznamné a nutno zvýšit velikost výběrového souboru, počet vzorků i počet proměnných parametrů.

11 STANOVENÍ ODPORU PROTI STLAČENÍ

Pro zkoušku byl zvolen stroj ZWICK ROELL 1456 dle normy ČSN EN ISO 3386. Pomocí zkoušky byl srovnáván materiál ve třech stupních ozáření (0, 99 a 165 kGy), při pokojové teplotě +23°C. Pro tuto zkoušku byly zkušební tělesa vyřezány z bloku materiálu na rozměr 50x50x50 mm. Před zkoušením se nechaly vzorky kondicionovat 24 hodin při pokojové teplotě. Pro každý materiál bylo 10 vzorků, které byly poměřeny (každý rozměr 5x), podle normy ČSN EN ISO 1923.

Hlavní pohyb stroje byl ve směru vertikálním, rychlostí 80 mm/min. Těleso bylo umístěno mezi stlačovací desky. Desky měly v sobě rýhy, které sloužily pro únik vzduchu. Bylo důležité vložit zkušební vzorek na střed stlačovacích desek. Desky stlačovaly zkušební vzorek o 70% jeho základní výšky. Zkouška probíhala ve čtyřech stlačeních vzorku. Při čtvrtém stlačení se zaznamenávala stlačovací síla.

11.1 Naměřená data

- NEOZÁŘENÝ VZOREK

Tab. 30 Naměřené hodnoty

Číslo vzorku	CC70[kPa]	F 4. [N]
1	2,67	343,00
2	2,95	373,00
3	3,04	386,00
4	2,97	377,00
5	3,04	386,00
6	2,91	366,00
7	3,21	431,00
8	3,15	418,00
9	2,99	395,00
10	2,95	397,00

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 99 kGy

Tab. 31 Naměřené hodnoty

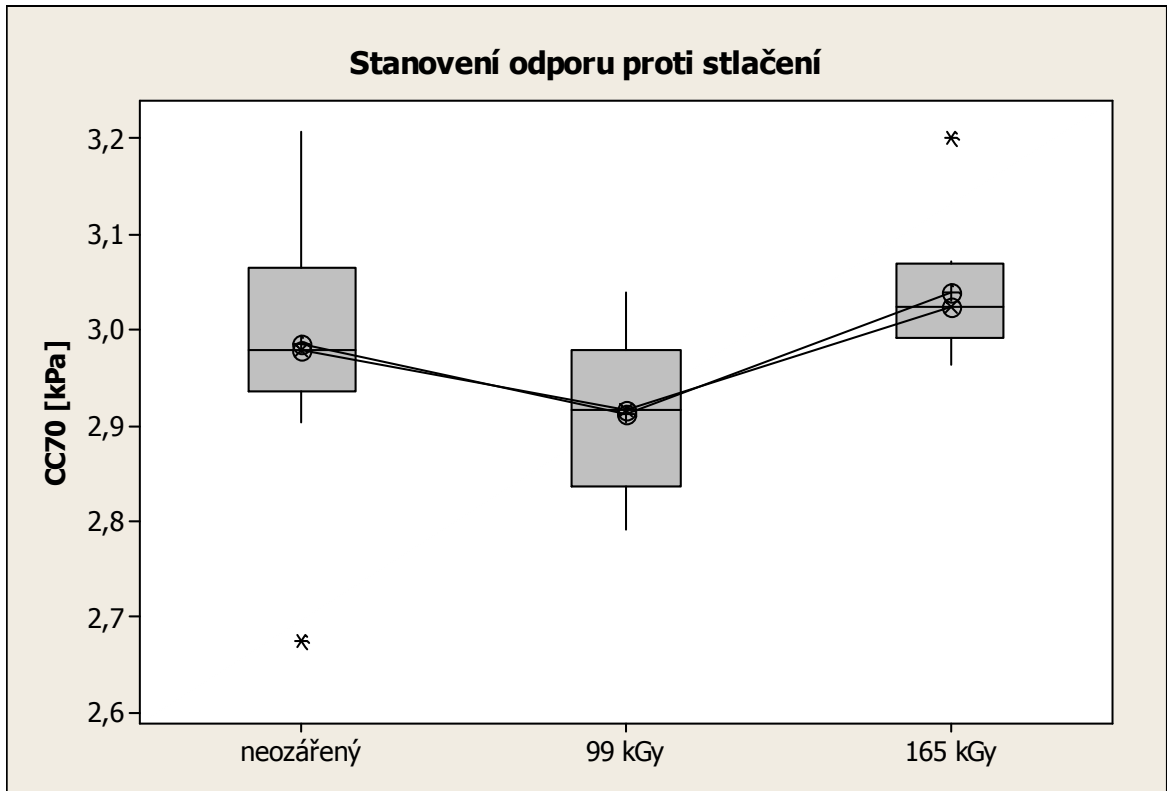
Číslo vzorku	CC70[kPa]	F 4. [N]
1	3,00	381,00
2	3,04	385,00
3	2,88	366,00
4	2,95	372,00
5	2,81	354,00
6	2,94	371,00
7	2,90	366,00
8	2,97	374,00
9	2,85	360,00
10	2,79	353,00

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 165 kGy

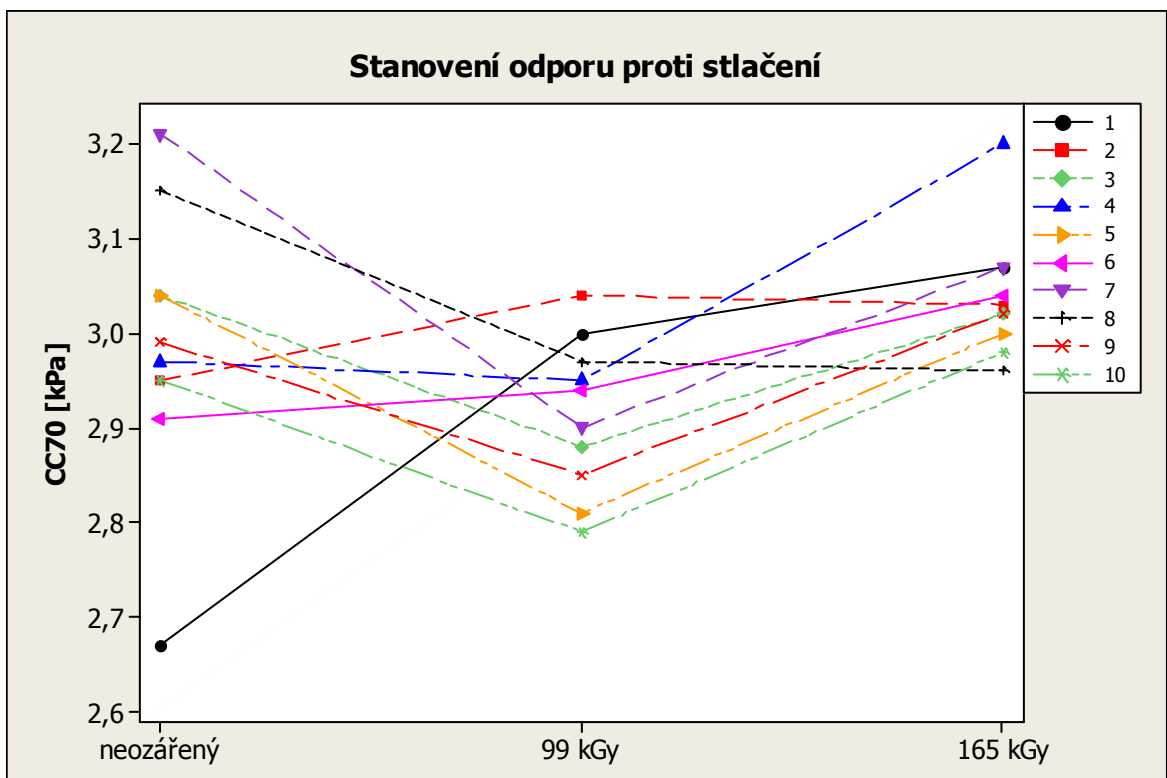
Tab. 32 Naměřené hodnoty

Číslo vzorku	CC70[kPa]	F 4. [N]
1	3,07	416,00
2	3,03	412,00
3	3,02	411,00
4	3,20	437,00
5	3,00	404,00
6	3,04	415,00
7	3,07	416,00
8	2,96	399,00
9	3,02	410,00
10	2,98	403,00

- SROVNÁNÍ VŠECH VZORKŮ



Obr. 37 Srovnání vzorků pro zkoušku: Stanovení odporu proti stlačení



Obr. 38 Srovnání vzorků pro zkoušku: Stanovení odporu proti stlačení

Statisticky bylo dokázáno, že s možností omylu 5% je možné zamítnout H_0 , což značí, že vliv záření na odpor proti stlačení je statisticky významný.

Při stanovení odporu proti stlačení bylo prokázáno, že statisticky je vliv ozařování (míry zesíťení) na tento parametr významný. Na druhou stranu se neprokázala významná tendence změny odporu proti stlačení v závislosti na míře ozařování/zesíťení. Očekávalo se zvyšování odporu proti stlačení, ale toto nebylo v rámci provedených zkoušek prokázáno.

12 TRVALÁ DEFORMACE PŘI CYKlickÉM NAMÁHÁNÍ

Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN EN ISO 7214. Pomocí zkoušky byly srovnávány vzorky ve třech stupních ozáření (0, 99 a 165 kGy). Pro tuhle zkoušku byla zkušební tělesa vyřezána z bloku materiálu na rozměr 50x50x50 mm. Pro každý materiál byly 3 vzorky, které byly poměřeny (každý rozměr 5x), podle normy ČSN EN ISO 1923. Před zkoušením se nechaly vzorky kondicionovat 24 hodin při pokojové teplotě.

Zkouška probíhala tak, že byl vzorek vložen mezi desky měřícího zařízení a kompresí 80 000 krát byl stlačen na 25% tloušťky zkušebního vzorku rychlostí 60 stlačení/min. Po 24 hodinách byl vzorek poměřen dle normy ČSN EN ISO 1923.

- NEOZÁŘENÝ VZOREK

Tab. 33 Naměřené a vypočítané hodnoty

0 kGy	před zkouškou [mm]	po zkoušce [mm]	Cf [%]
1	52,33	51,50	1,61
2	51,36	50,50	1,70
3	52,77	52,10	1,29

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 99 kGy

Tab. 34 Naměřené a vypočítané hodnoty

99 kGy	před zkouškou [mm]	po zkoušce [mm]	Cf [%]
1	51,08	47,50	7,54
2	51,27	47,80	7,26
3	51,25	47,70	7,44

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 165 kGy

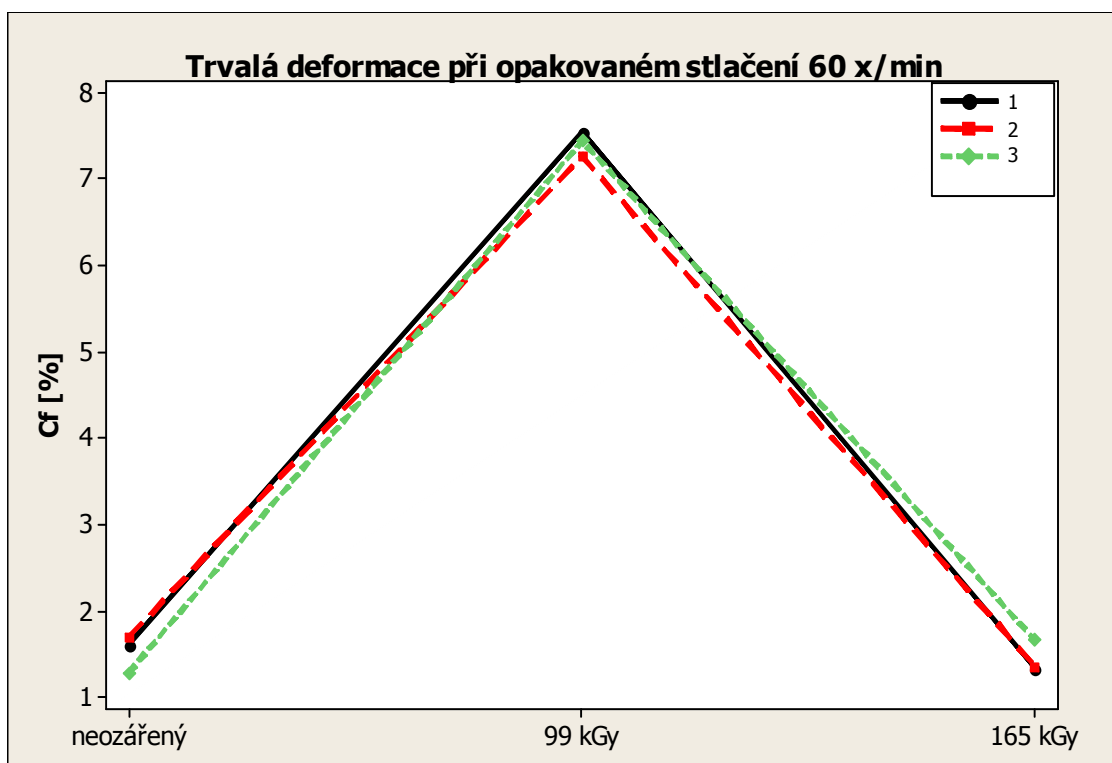
Tab. 35 Naměřené a vypočítané hodnoty

165 kGy	před zkouškou [mm]	po zkoušce [mm]	Cf [%]
1	52,49	51,80	1,34
2	52,71	52,00	1,37
3	52,16	51,30	1,67

- SROVNÁNÍ VŠECH VZORKŮ

Tab. 36 Srovnání výsledků

	Trvalá deformace [%]
0 kGy	56,76
99 kGy	54,22
165 kGy	56,83



Obr. 39 Srovnání vzorků pro zkoušku: Trvalá deformace při opakovaném stlačení

Stanovení trvalé deformace při cyklickém namáhání poskytlo překvapivé výsledky. U vzorku s nízkým stupněm ozáření byl zaznamenán pokles, významný nárůst hodnoty trvalé deformace u vzorku ozářeného dávkou 99 kGy a naopak u vzorku s dávkou ozáření 165 kGy byla změřena hodnota na úrovni původního (neozářeného) vzorku. Toto lze přisuzovat skutečnosti, že pěnové materiály vyžadují vyšší dávku záření nebo delší čas ozařování – a toto opět vyplývá z fyzikální charakteristiky pěny a prostupu záření materiálem. Pro přesnější charakteristiky by bylo nutné provést řadu testů a teprve následně určovat závislosti. Také frekvence zatěžování při tomto testu hraje jistě významnou roli a bylo by vhodné tento aspekt zakomponovat do prováděných testů. Tato zkouška je zřejmě nejpodstatnější pro finální výrobek.

13 STANOVENÍ TRVALÉ DEFORMACE

Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN EN ISO 1856. Pomocí zkoušky byl srovnáván jeden materiál ve třech stupních ozáření (0, 99 a 165 kGy). Pro tuhle zkoušku byla zkušební tělesa vyřezána z bloku materiálu na rozměr 50x50x50 mm. Pro každý materiál jsme měli 8 vzorků, které byly poměřeny (každý rozměr 5x), podle normy ČSN EN ISO 1923. Před zkoušením se nechaly vzorky kondicionovat 24 hodin při pokojové teplotě.

Zkouška probíhala tak, že se zkušební tělesa vložila mezi desky stlačovacího zařízení. Pomocí zařízení byly vzorky stlačeny na 50 % (25mm). Do 15 minut od stlačení se musely vzorky vložit do sušárny, která byla předehřátá na 70°C. Po 22 hodinách byly vzorky vytaženy a do jedné minuty uvolněny ze stlačovacího zařízení na povrch s nízkou tepelnou vodivostí. Po 30 minutách byly vzorky změřeny podle normy ČSN EN ISO 1923.

- NEOZÁŘENÝ VZOREK

Tab. 37 Naměřené hodnoty

číslo vzorku	Deformace [%]
1	57,34
2	56,68
3	56,41
4	57,11
5	56,96
6	56,92
7	56,25
8	56,38

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 99 kGy

Tab. 38 Naměřené hodnoty

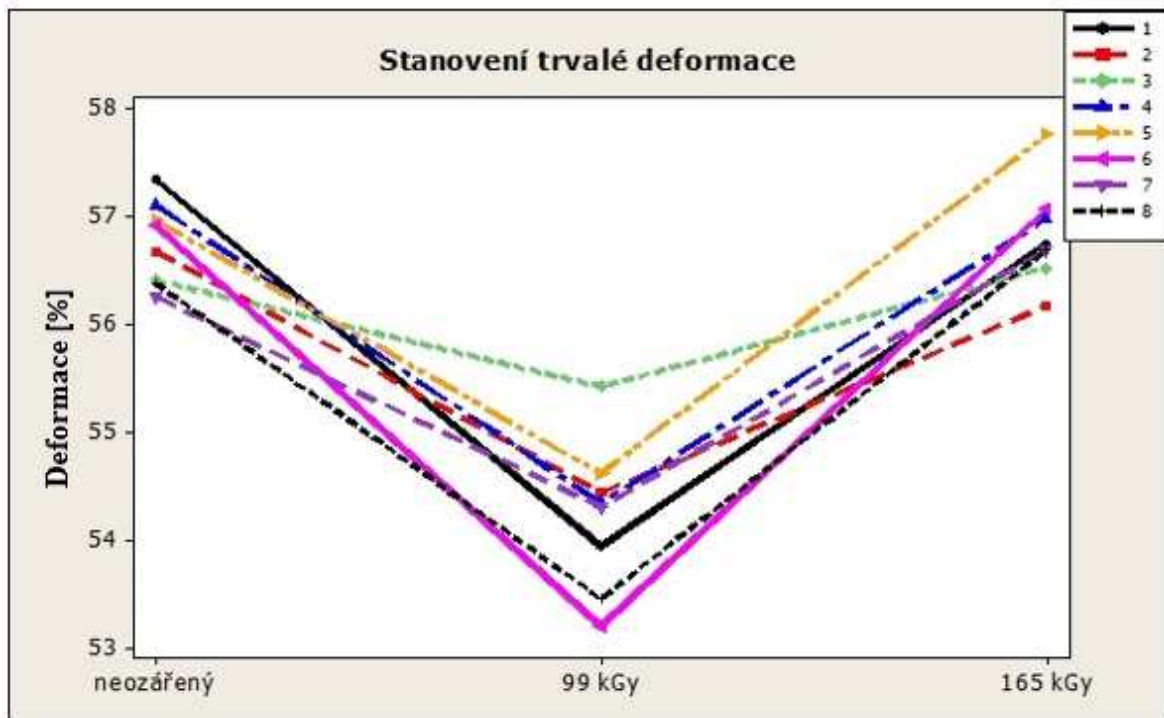
číslo vzorku	Deformace [%]
1	53,94
2	54,44
3	55,42
4	54,34
5	54,62
6	53,20
7	54,31
8	53,46

- OZÁŘENÝ VZOREK DÁVKOU 165 kGy

Tab. 39 Naměřené hodnoty

číslo vzorku	Deformace [%]
1	56,75
2	56,17
3	56,53
4	56,98
5	57,75
6	57,07
7	56,69
8	56,69

SROVNÁNÍ VŠECH VZORKŮ



Obr. 40 Srovnání vzorků pro zkoušku: Stanovení trvalé deformace

Statisticky bylo prokázáno, že s možností omylu 5% je možné zamítnout H_0 , což značí, že vliv ozáření na odpor proti stlačení je statisticky významný.

Při stanovení trvalé deformace nebyl prokázán téměř žádný vliv, který by byl staticky významný. U vzorků ozářených 99 kGy by se dalo spíše hovořit o degradaci, než o zlepšení vlastností vlivem záření. U vzorků ozářených dávkou 165 kGy byly naměřené hodnoty na úrovni původního (neozářeného) vzorku. Výsledek zkoušky je zcela neočekávaný a nekorresponduje s teoretickými předpoklady.

ZÁVĚR

Výsledky uvedené a diskutované v praktické části diplomové práce neprokázaly teoreticky předpokládané hypotézy. Pravděpodobným důvodem je skutečnost, že pro lehčené struktury platí fyzikálně i chemicky jiná pravidla než u procesu radiačního síťování nelehčených polymerů. Hrají zde zřejmě významnou roli mechanismy prostupu a šíření záření ve struktuře. Lze předpokládat, že významnou roli zde bude hrát doba vystavení radiačnímu záření – více než samotná dávka. Předpokládaný viditelný vliv na fyzikálně mechanické vlastnosti pěn určených pro nábytkářské aplikace tedy nebyl prokázán.

U zkoušky stanovení pevnosti v tahu jsme nezjistili téměř žádný vliv na vylepšení vlastností materiálu. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u neozářených vzorků. Nejnižších hodnot dosahovaly vzorky ozářené dávkou 99 kGy. Avšak s výsledky vzorků ozářených dávkou 165 kGy se moc nelišily.

Při hodnocení tažnosti byl prokázán viditelný vliv ozáření, který měl ale opačnou tendenci. Ozářené vzorky prokazovaly horší tažnost než neozářené. Nejvyšší hodnoty E_b dosáhl neozářený vzorek (62,16 %). Daleko nižších hodnot dosáhly zbylé vzorky, ozářené dávkou 99 kGy (39,8 %) a 165 kGy (47,6 %).

U zkoušky odolnosti proti dalšímu trhání se projevil opět opačný efekt vlivu ozáření, než jsme očekávali. Neozářené vzorky dosáhly 14,56 N/cm. Nejhorší hodnoty dosáhly vzorky ozářené dávkou 165 kGy (13,63 N/cm).

U zkoušky stanovení odporu proti stlačení bylo prokázáno, že statisticky je vliv ozařování na tento parametr významný. U hodnot zjištěných u téhle zkoušky pozorujeme velký vliv na změnu odporu proti stlačení v závislosti na míře ozařování. Jako u jediné zkoušky tady dosáhl nejlepší hodnoty jiný, než ozářený vzorek. Vzorky ozářené dávkou 169 kGy dosáhly nejvyšší hodnoty odporu proti stlačení 3,039 kPa. Nejnižších hodnot dosáhly vzorky ozářené 99 kGy (2,912 kPa)

V případě stanovení trvalé deformace při cyklickém namáhání sledujeme významný nárůst hodnot u vzorků ozářených dávkou 99 kGy (7,41 %). A naopak pokles u vzorků ozářených dávkou 165 kGy (1,46 %). Předpokládáme, že tyto mechanické vlastnosti u lehčených materiálů má velký vliv vyšší dávka záření nebo delší čas ozařování. Vzorky ozářené vyšší dávkou záření prokazují daleko lepší odolnost proti trvalé deformaci při cyklickém namáhání.

V případě trvalé deformace vykazují vzorky ozářené 99 kGy (54,22 %) daleko horší vlastnosti než vzorky neozářené (56,76 %), nebo ozářené 165 kGy (56,83 %). Vlivem ozáření materiál nejdříve projevoval zhoršení a působením vyšší dávky záření se vlastnosti vrátily téměř do původního stavu.

Ve většině zkoušek nemělo ozáření očekávaný efekt. U některých parametrů ale byly pozorovány statisticky významné posuny naměřených hodnot. Proto by bylo vhodné ve zkoumané problematice dále pokračovat, rozšířit rozsah vstupních parametrů, zaměřit se i na další aspekty ovlivňující potenciálně míru zesíťení a v rámci měření vlastností také rozšířit velikosti výběrových souborů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7
- [2] SHAU, T.L.: Resin evolution for thermoplastic foam extrusion. In: *Blowing Agents and Foaming Processes 2004*, Hamburg, SRN, 10. – 11. 5. 2004, s.125.
- [3] RODRIGUEZ-PEREZ, M.A. – ALVAREZ-LAINEZ, M. – RUIZ-HERRERO, J.L. – DE SAJA, A.: Tailor made polyolefin foams: an answer to customers' requirements. In: *Blowing Agents and Foaming Processes 2006*, Munich, SRN, 16. – 17. 5. 2006, přednáška č. 18.
- [4] RUINAARD, H.: How to choose a Polyolefin grade for Physical Foaming. In: *Blowing Agents and Foaming Processes 2005*, Stuttgart, SRN, 10. – 11.5. 2005.
- [5] PRALLER, A., *Kunststoffe*, 95, 2005, č. 6, s. 96.
- [6] JÖNSSON, L. – ROSSKOTHEN, K.R., *Kunststoffe*, 93, 2003, č. 7, s. 86.
- [7] WIESNER, M.: The right chemical foaming agent for your application. In: *Blowing Agents and Foaming Processes 2004*, Hamburg, SRN, 10. – 11. 5. 2004, s. 5
- [8] WEGNER, J., *Kunststoffe*, 95, 2005, č. 1, s. 86.
- [9] OBERBACH, K. – BAUR, E. – BRINKMANN, S. – SCHMACHTENBERG, E.: *SaechtlingKunststoff-Taschenbuch*, München, Carl HanserVerlag, 2004, s. 268.
- [10] RODRIGUEZ-PEREZ, M.A. – ALVAREZ-LAINEZ, M. – RUIZ-HERRERO, J.L. – DE SAJA, A.: Tailor made polyolefin foams: an answer to customers' requirements. In: *Blowing Agents and Foaming Processes 2006*, Munich, SRN, 16. – 17. 5. 2006, přednáška č. 18.
- [11] Prospekty od firmy BGS
- [12] KOLEKTIV AUTORŮ: *Základy fyziky polymerů*, Praha: Macro, 1998
- [13] Mechanické zkoušení kovů [online]. [cit. 2015-02-23]. Dostupný z:
[Http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm)
- [14] Zkoušení materiálů [online]. [cit. 2015-02-23]. Dostupný z:
[Http://tzs.kmm.zcu.cz/material2.pdf](http://tzs.kmm.zcu.cz/material2.pdf)
- [15] RYBNIKÁŘ, František. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1965, 418 s.

- [16] ČSN EN ISO 527-1 (91486). *Plasty – stanovení tahových vlastností: část 1 – základní principy*. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, a.s., Srpen 1997
- [17] ČSN EN ISO 8067 (85065). *Měkké lehčené polymerní materiály – Stanovení odolnosti proti dalšímu trhání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, EAN 8590963850658, 12s
- [18] ČSN EN ISO 3386 (87009). *Měkké lehčené polymerní materiály – Stanovení odporu proti stlačení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, EAN 8590963850658, 12s
- [19] ČSN EN ISO 1856 (62506). *Měkké lehčené polymerní materiály – Stanovení trvalé deformace v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, EAN 8590963625065, 8s
- [20] ČSN EN ISO 7214 (90978). *Měkké lehčené polymerní materiály – Stanovení trvalé deformace v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, EAN 8590963909783, 24s
- [21] Laminované desky [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupný z:
<http://www.spur.cz/cs/sortiment/spuro-foam/laminovane-desky/>
- [22] Instron 8871 [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupný z:
<http://www.igitur.cz/pdf/8800/8870.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

g	Gram
kg	kilogram
cm	centimetr
m	metr
mm	milimetr
%	procenta
°	stupně
MPa	megapascaly
kPa	kilopascaly
Pa	pascaly
H ₂	vodík
H ₂ SO ₄	kyselina sírová
HCl	kyselina chlorovodíková
HNO ₃	kyselina dusičná
CO ₂	oxid uhličitý
kHz	kilohertz
MeV	milion elektron volt
β	beta
γ	gama
TS	maximální napětí v tahu
E _b	procentuální prodloužení
S	obsah
F	síla
R	odolnost proti dalšímu trhání

F _{max}	maximální síla
CC	odpor proti stlačení
H ₀	nulová hypotéza
H _a	alternativní hypotéza
PP	polypropylen
PVC	polyvinylchlorid
PE	Polyethylen
PUR	Polyurethan
LDPE	(Low Density) Nízkohustotní polyetylen
HDPE	(High Density) Vysokohustotní polyetylen
LLDPE	(Linear Low Density) Lineární polyetylen s nízkou hustotou
ULDPE	(Ultra-Low Density) Polyethylen s velmi nízkou hustotou
MDPE	(Medium Density) Polyetylen se střední hustotou
HMWPE	(High Molecular Weight) Polyetylen s vysokou molekulovou hmotností
UHMWPE	(Ultra-High Molecular Weight) Polyetylen s ultravysokou molekulovou hmotností

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Struktura makromolekul různých typů PE 1 – HDPE, 2 – LLDPE (krátké větvení), 3 – LDPE (dlouhé a krátké větvení, a – trubkový reaktor, b – autokláv) [1].....	13
<i>Obr. 2</i> Vysokotlaká polymerace etylenu (1 – plynojem, 2 – kompresor, 3 – filtr, 4 – explozní pojistka, 5 – iniciátory, 6 – reaktor, 7 – chladič produktu, 8 – redukční ventil, 9 – cyklón, 10 – odlučovač PE, 11 – extrudér, 12 – nezreagovaný ethylen [1]	14
<i>Obr. 3</i> Schéma klasického výrobního zařízení pro suspenzní výrobu polyethylenu (1 – polymerační reaktor, 2 – rozkladný reaktor, 3 – odstředivka, 4 – extraktor, 5 – sušárna, 6 – extrudér [1].....	16
<i>Obr. 4</i> Vertikální lehčení síťovaného PE [3].....	21
<i>Obr. 5</i> Pasivní a aktivní nukleace	25
<i>Obr. 6</i> Srovnání struktury a)lehčeného polyolefinu s otevřenými dutinkami, b) lehčeného polyolefinu s uzavřenými dutinkami a c) polyuretanu se strukturou otevřených dutinek.....	27
<i>Obr. 7</i> Zvuková pohltivost lehčených polyolefinů a) s otevřenými dutink	28
<i>Obr. 8</i> Princip elektronového záření	31
<i>Obr. 9</i> Princip gama záření	32
<i>Obr. 10</i> Schéma síťování PE elektronovým zářením[11]	32
<i>Obr. 11</i> Schopnost pronikání elektronového- β a gama- γ záření[11]	33
<i>Obr. 12</i> Charakteristika vlastností termoplastů v závislosti na dávce ozáření	35
<i>Obr. 13</i> Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku[16]	41
<i>Obr. 14</i> Zkušební těleso typu angle pro metodu B[17].....	42
<i>Obr. 15</i> Pěnový polyetylen EPE [21]	46
<i>Obr. 16</i> Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456.....	47
<i>Obr. 17</i> Zkušební stroj Instron 8871.....	48
<i>Obr. 18</i> Mechanický vysekávací lis.....	49
<i>Obr. 19</i> Ruční vřetenový lis	49
<i>Obr. 20</i> Ozařovací linka firmy BGS.....	50
<i>Obr. 21</i> Ozářené desky polyethylenu a jejich označení	51
<i>Obr. 22</i> Zkušební těleso pro tahovou zkoušku	51
<i>Obr. 23</i> Zkušební těleso pro zkoušku odolnosti proti dalšímu trhání.....	52

<i>Obr. 24 Zkušební těleso pro ostatní typy zkoušek.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 25 Výsledky pro pevnost v tahu</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 26 Výsledky pro pevnost v tahu</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 27 Výsledky pro pevnost v tahu</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 28 Srovnání výsledků pro tahovou zkoušku.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 29 Výsledky pro zkoušku tažnosti</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 30 Výsledky pro zkoušku tažnosti</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 31 Výsledky pro zkoušku tažnosti</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 32 Srovnání vzorků pro zkoušku tažnosti</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 33 Výsledky pro zkoušku odolnosti proti dalšímu trhání</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 34 Výsledky pro zkoušku odolnosti proti dalšímu trhání</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 35 Výsledky pro zkoušku odolnosti proti dalšímu trhání</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 36 Srovnání vzorků pro zkoušku : Stanovení odolnosti proti dalšímu trhání</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 37 Srovnání vzorků pro zkoušku: Stanovení odporu proti stlačení.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 38 Srovnání vzorků pro zkoušku: Stanovení odporu proti stlačení.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 39 Srovnání vzorků pro zkoušku: Trvalá deformace při opakovaném stlačení</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 40 Srovnání vzorků pro zkoušku : Stanovení trvalé deformace</i>	<i>81</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Charakteristiky nejvýznamnějších polyolefinů [1]</i>	12
<i>Tab. 2 Třídění PE podle hustoty [1]</i>	13
<i>Tab. 3 Rozdíly v technologických podmínkách [1]</i>	15
<i>Tab. 4 Přehled fyzikálních nadouvadel [4]</i>	24
<i>Tab. 5 Klasifikace polymerů podle jejich reakce na ionizující záření</i>	34
<i>Tab. 6 Příklad vybraných aplikací v průmyslu a vlastností získaných po ozáření[11]</i>	37
<i>Tab. 7 Rozměry zkušebních těles pro tahové zkoušky polymerů [16]</i>	40
<i>Tab. 8 Naměřené hodnoty pro pevnost v tahu</i>	54
<i>Tab. 9 Vypočítané hodnoty</i>	55
<i>Tab. 10 Naměřené hodnoty pro pevnost v tahu</i>	55
<i>Tab. 11 Vypočítané hodnoty</i>	56
<i>Tab. 12 Naměřené hodnoty pro pevnost v tahu</i>	57
<i>Tab. 13 Vypočítané hodnoty</i>	58
<i>Tab. 14 Srovnání vzorků pro pevnost v tahu</i>	58
<i>Tab. 15 Naměřené hodnoty</i>	60
<i>Tab. 16 Vypočítané hodnoty</i>	61
<i>Tab. 17 Naměřené hodnoty</i>	61
<i>Tab. 18 Vypočítané hodnoty</i>	62
<i>Tab. 19 Naměřené hodnoty</i>	63
<i>Tab. 20 Vypočítané hodnoty</i>	64
<i>Tab. 21 Naměřené hodnoty</i>	66
<i>Tab. 22 Vypočítané hodnoty</i>	67
<i>Tab. 23 Naměřené hodnoty</i>	68
<i>Tab. 24 Vypočítané hodnoty</i>	69
<i>Tab. 25 Naměřené hodnoty</i>	69
<i>Tab. 26 Vypočítané hodnoty</i>	70
<i>Tab. 27 Naměřené hodnoty</i>	73
<i>Tab. 28 Naměřené hodnoty</i>	74
<i>Tab. 29 Naměřené hodnoty</i>	74

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU A TAŽNOSTI

PŘÍLOHA P II: STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI DALŠÍMU TRHÁNÍ

PŘÍLOHA P III: ODPORU PROTI STLAČENÍ

PŘÍLOHA P IV: STANOVENÍ TRVALÉ DEFORMACE – PŘED ZKOUŠKOU

PŘÍLOHA P V: TRVALÁ DEFORMACE PŘI CYKLICKÉM NAMÁHÁNÍ

PŘÍLOHA P I: STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU A TAŽNOSTI

Stanovení pevnosti v tahu a tažnosti

MĚŘENÍ

TLOUŠŤKY[mm]

0kGy

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	10,70	10,40	10,61	10,93	10,61	11,04	10,81	10,99	10,67	10,08
	10,63	10,38	10,67	10,94	10,67	11,03	10,87	10,97	10,69	10,03
	10,61	10,41	10,59	10,91	10,77	11,06	10,82	11,05	10,63	10,02
	10,72	10,42	10,65	10,89	10,76	11,08	10,89	11,04	10,58	10,05
	10,69	10,39	10,66	10,84	10,72	11,02	10,79	11,03	10,63	10,10
∅	10,67	10,40	10,64	10,90	10,71	11,05	10,84	11,02	10,64	10,06

100kGy

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11,01	10,73	11,64	10,31	11,35	11,57	10,29	10,17	10,27	10,63
	10,99	10,76	11,64	10,32	11,29	11,51	10,23	10,18	10,30	10,64
	10,98	10,75	11,68	10,34	11,36	11,48	10,21	10,16	10,34	10,63
	11,00	10,74	11,66	10,33	11,36	11,43	10,24	10,11	10,35	10,59
	11,03	10,72	11,65	10,32	11,36	11,56	10,29	10,12	10,33	10,64
∅	11,00	10,74	11,65	10,32	11,34	11,51	10,25	10,15	10,32	10,63

165kGy

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	10,21	10,34	10,06	11,36	11,10	10,88	11,03	10,58	10,99	10,98
	10,24	10,28	10,04	11,32	11,04	10,89	11,01	10,65	11,03	11,01
	10,20	10,30	10,06	11,33	11,02	10,88	11,08	10,63	11,06	10,99
	10,19	10,32	10,07	11,31	11,00	10,82	11,03	10,58	11,04	11,01
	10,20	10,27	10,05	11,34	11,03	10,86	11,07	10,62	11,05	10,95
∅	10,21	10,30	10,06	11,33	11,04	10,87	11,04	10,61	11,03	10,99

Naměřené hodnoty

0 kGy

	a[mm]	b[mm]	S[mm]	F{lo max}[N]	TS[kPa]	Eb [%]	L[mm]	Lo[mm]
1	10,67	10,64	113,53	16,30	143,57	29,20	32,30	25,00
2	10,40	10,64	110,66	14,40	130,13	67,20	41,80	25,00
3	10,64	10,64	113,21	18,00	159,00	81,20	45,30	25,00
4	10,90	10,64	115,98	15,00	129,33	30,40	32,60	25,00
5	10,71	10,64	113,95	19,70	172,88	92,00	48,00	25,00
6	11,05	10,64	117,57	19,70	167,56	106,00	51,50	25,00
7	10,84	10,64	115,34	17,50	151,73	45,20	36,30	25,00
8	11,02	10,64	117,25	13,90	118,55	10,00	27,50	25,00
9	10,64	10,64	113,21	13,40	118,36	65,20	41,30	25,00
10	10,01	10,64	106,51	14,10	132,38	95,20	48,80	25,00

99 kGy

	a[mm]	b[mm]	S[mm]	F _{lo max} [N]	TS[kPa]	E _b [%]	L[mm]	L ₀ [mm]
1	11,00	10,64	117,04	14,80	126,45	23,20	30,80	25,00
2	10,74	10,64	114,27	16,50	144,39	37,20	34,30	25,00
3	10,65	10,64	113,32	19,00	167,67	73,20	43,30	25,00
4	10,32	10,64	109,80	12,20	111,11	10,40	27,60	25,00
5	11,34	10,64	120,66	19,10	158,30	36,00	34,00	25,00
6	11,51	10,64	122,47	14,80	120,85	20,40	30,10	25,00
7	10,25	10,64	109,06	11,70	107,28	28,00	32,00	25,00
8	10,15	10,64	108,00	13,00	120,37	56,40	39,10	25,00
9	10,32	10,64	109,80	13,10	119,31	39,20	34,80	25,00
10	10,63	10,64	113,10	14,90	131,74	74,00	43,50	25,00

165 kGy

	a[mm]	b[mm]	S[mm]	F _{lo max} [N]	TS[kPa]	E _b [%]	L[mm]	L ₀ [mm]
1	10,21	10,64	108,63	15,10	139,00	36,40	34,10	25,00
2	10,30	10,64	109,59	13,30	121,36	13,20	28,30	25,00
3	10,06	10,64	107,04	12,60	117,71	68,40	42,10	25,00
4	11,33	10,64	120,55	17,70	146,83	17,60	29,40	25,00
5	11,04	10,64	117,47	18,60	158,34	80,40	45,10	25,00
6	10,87	10,64	115,66	14,90	128,83	68,80	42,20	25,00
7	11,04	10,64	117,47	19,40	165,15	92,80	48,20	25,00
8	10,61	10,64	112,89	12,70	112,50	5,60	26,40	25,00
9	11,04	10,64	117,47	18,70	159,19	71,60	42,90	25,00
10	10,99	10,64	116,93	15,90	135,98	21,20	30,30	25,00

PŘÍLOHA P II: STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI DALŠÍMU TRHÁNÍ

Stanovení odolnosti proti dalšímu trhání

MĚŘENÍ

TLOUŠŤKY[mm]

0 kGy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10,02	10,21	10,16	10,27	10,63	10,45	10,15	10,87	10,44	10,64	
10,06	10,24	10,09	10,29	10,52	10,46	10,08	10,90	10,61	10,61	
10,04	10,19	10,07	10,32	10,65	10,41	10,20	10,89	10,45	10,66	
10,05	10,20	10,17	10,29	10,45	10,49	10,13	10,81	10,42	10,58	
10,01	10,22	10,10	10,34	10,48	10,42	10,09	10,79	10,51	10,59	
∅	10,04	10,21	10,12	10,30	10,55	10,45	10,13	10,85	10,49	10,62

100kGy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10,03	10,86	11,46	11,07	11,72	10,67	10,23	11,51	12,34	10,02	
10,06	10,94	11,62	10,99	11,68	10,59	10,25	11,48	12,36	10,03	
10,08	10,97	11,59	11,08	11,71	10,71	10,28	11,56	12,29	10,04	
10,06	10,97	11,38	11,03	11,77	10,72	10,24	11,49	12,32	10,06	
10,07	10,89	11,42	11,09	11,67	10,65	10,20	11,59	12,34	10,05	
∅	10,06	10,93	11,49	11,05	11,71	10,67	10,24	11,53	12,33	10,04

165kGy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10,35	11,72	10,64	10,55	10,43	10,09	10,44	10,82	10,16	10,10	
10,37	11,69	10,70	10,47	10,40	10,12	10,43	10,78	10,22	10,03	
10,32	11,49	10,79	10,61	10,44	10,02	10,35	10,81	10,18	10,07	
10,29	11,56	10,58	10,63	10,41	10,06	10,38	10,73	10,23	10,04	
10,37	11,56	10,62	10,72	10,38	10,01	10,39	10,69	10,25	10,08	
∅	10,34	11,60	10,67	10,60	10,41	10,06	10,40	10,77	10,21	10,06

Naměřené hodnoty

	neozářený			100kGy			165kGy		
	a[mm]	Fmax[N]	R[N/cm]	a[mm]	Fmax[N]	R[N/cm]	a[mm]	Fmax[N]	R[N/cm]
1	10,04	18,80	18,73	10,06	14,30	14,21	10,34	13,00	12,57
2	10,21	12,30	12,04	10,93	15,80	14,46	11,60	15,60	13,44
3	10,12	15,20	15,02	11,49	18,40	16,01	11,67	14,30	12,26
4	10,30	15,80	15,34	11,05	21,00	19,00	10,60	16,10	15,19
5	10,55	16,00	15,17	11,71	20,30	17,34	10,41	17,30	16,62
6	10,45	15,80	15,13	10,67	11,60	10,87	10,06	14,60	14,51
7	10,13	14,20	14,02	10,24	10,80	10,55	10,40	14,60	14,04
8	10,85	16,90	15,57	11,53	16,20	14,06	10,77	16,80	15,60
9	10,49	13,30	12,68	12,33	19,30	15,65	10,21	12,00	11,76
10	10,62	12,60	11,87	10,04	10,10	10,06	10,06	10,40	10,33

PŘÍLOHA P III: ODPORU PROTI STLAČENÍ

Stanovení odporu proti stlačení 3386

MĚŘENÍ

TLOUŠŤKY[mm]

0 kGy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
51,27	50,58	50,83	50,77	50,85	50,36	53,75	53,17	53,15	53,74	
51,29	50,65	50,89	50,78	50,98	50,50	53,63	53,20	53,17	53,99	
51,27	50,71	50,73	50,82	50,83	50,39	53,61	53,10	52,76	53,94	
51,30	50,68	50,79	50,92	50,73	50,39	53,77	53,21	52,65	53,90	
51,28	50,66	50,76	50,60	50,76	50,45	53,98	53,10	52,64	53,92	
∅	51,28	50,66	50,80	50,78	50,83	50,42	53,75	53,16	52,87	53,90

100kGy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
50,75	50,8	50,85	50,42	50,36	50,49	50,51	50,30	50,59	50,57	
50,74	50,76	50,73	50,53	50,41	50,45	50,57	50,30	50,64	50,59	
50,80	50,70	50,65	50,40	50,33	50,68	50,57	50,39	50,61	50,62	
50,75	50,83	50,63	50,48	50,57	50,49	50,46	50,45	50,60	50,61	
50,82	50,71	50,56	50,45	50,43	50,52	50,67	50,34	50,55	50,54	
∅	50,77	50,76	50,68	50,46	50,42	50,53	50,56	50,36	50,60	50,59

165kGy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
54,14	54,43	54,42	54,60	53,94	54,54	54,19	53,86	54,51	54,19	
54,14	54,40	54,41	54,60	53,93	54,47	54,17	53,87	54,40	54,20	
54,20	54,44	54,41	54,64	53,93	54,51	54,19	53,86	54,25	54,15	
54,27	54,35	54,39	54,67	53,88	54,56	54,22	53,85	54,41	54,17	
54,24	54,48	51,41	54,53	53,86	54,60	54,26	53,86	54,40	51,15	
∅	54,20	54,42	53,81	54,61	53,91	54,54	54,21	53,86	54,39	53,57

Naměřené hodnoty

0kGy	∅	F.4. [N]	CC70[kPa]	S[mm ²]
1	51,28	343,00	2,68	128200
2	50,66	373,00	2,95	126650
3	50,80	386,00	3,04	127000
4	50,78	377,00	2,97	126950
5	50,83	386,00	3,04	127075
6	50,42	366,00	2,90	126025
7	53,75	431,00	3,21	134375
8	53,16	418,00	3,15	132900
9	52,87	395,00	2,99	132200
10	53,90	397,00	2,95	134750

100kGy	∅	F.4. [N]	CC70[kPa]	S[mm ²]
1	50,77	381,00	3,00	126925
2	50,76	385,00	3,04	126700
3	50,68	366,00	2,88	126900
4	50,46	372,00	2,95	126150
5	50,42	354,00	2,81	126050
6	50,53	371,00	2,94	126325
7	50,56	366,00	2,90	126400
8	50,36	374,00	2,97	125900
9	50,60	360,00	2,85	126500
10	50,59	353,00	2,79	126475

165kGy	\emptyset	F.4. [N]	CC70[kPa]	S[mm ²]
1	54,20	416,00	3,07	135475
2	54,42	412,00	3,03	136050
3	53,81	411,00	3,02	136025
4	54,61	437,00	3,20	136525
5	53,91	404,00	3,00	134775
6	54,54	415,00	3,04	136350
7	54,21	416,00	3,07	135525
8	53,86	399,00	2,96	134650
9	54,39	410,00	3,02	135975
10	53,57	403,00	2,98	135425

PŘÍLOHA P IV: STANOVENÍ TRVALÉ DEFORMACE PŘED ZKOUŠKOU

Stanovení trvale deformace

Měření tloušťky [mm]

PŘED ZKOUŠKOU

0 kGy

∅

1	50,01	50,04	50,01	50,02	50,04	50,03
	51,07	51,02	51,06	51,03	51,06	51,05
	54,18	54,12	54,16	54,15	54,17	54,16

2	50,40	50,44	50,42	50,41	50,44	50,42
	48,30	48,31	48,29	48,26	48,55	48,34
	53,74	53,71	53,75	53,70	53,73	53,73

3	50,66	50,38	50,83	50,44	50,41	50,54
	49,80	49,86	49,81	49,86	49,80	49,83
	53,22	53,28	53,19	53,19	53,20	53,22

4	50,40	50,49	50,42	50,34	50,41	50,41
	50,51	50,62	50,58	50,59	50,57	50,57
	53,92	53,95	53,96	53,91	53,98	53,94

5	50,44	50,40	50,39	50,42	50,45	50,42
	50,41	50,40	50,37	50,38	50,39	50,39
	53,81	53,82	53,86	53,86	53,85	53,84

6	50,15	50,26	50,20	50,18	50,18	50,19
	50,58	50,63	50,57	50,63	50,59	50,60
	53,67	53,67	53,72	53,74	53,69	53,70

7	50,71	50,75	50,82	50,69	50,78	50,75
	50,47	50,60	50,50	50,50	50,51	50,52
	53,47	53,45	53,46	53,52	53,46	53,47

8	50,54	50,59	50,58	50,55	50,58	50,57
	48,55	48,70	48,77	48,68	48,63	48,67
	53,14	53,12	53,15	53,15	53,14	53,14

99 kGy	PŘED ZKOUŠKOU	Ø					
1		50,69	50,76	50,56	50,59	50,52	50,61
		50,08	50,03	50,03	50,08	50,06	50,05
		50,76	50,65	50,74	50,64	50,71	50,69
2		50,34	50,40	50,22	50,37	50,42	50,35
		49,61	49,69	49,62	49,58	49,71	49,65
		51,00	51,01	50,97	51,02	51,05	51,01
3		49,48	49,54	49,49	49,48	49,46	49,49
		50,70	50,72	50,77	50,66	50,65	50,7
		49,95	49,98	50,81	49,85	49,91	52,39
4		50,05	50,02	50,01	50,02	50,01	50,02
		49,98	49,94	49,87	49,90	49,91	49,91
		51,05	51,08	51,02	51,05	51,08	51,06
5		50,18	50,16	50,10	50,16	50,18	50,15
		49,88	49,92	49,90	49,98	49,91	49,93
		51,14	51,17	51,14	51,15	51,14	51,15
6		49,88	49,89	49,88	49,86	49,89	49,88
		50,20	50,28	50,23	50,25	50,27	50,25
		49,59	49,53	49,50	49,58	49,64	49,57
7		50,17	50,13	50,16	50,17	50,13	50,15
		50,62	50,65	50,62	50,65	50,59	50,63
		50,69	50,66	50,74	50,60	50,64	50,67
8		50,40	50,42	50,47	50,40	50,47	50,43
		50,40	50,45	50,49	50,41	50,44	50,44
		49,94	49,93	49,91	49,90	49,94	49,93

165kGy

∅

1	50,62	50,63	50,57	50,65	50,60	50,62
	50,20	50,16	50,12	50,18	50,16	50,16
	54,90	54,95	54,87	54,86	54,60	54,84

2	50,05	50,09	50,03	50,03	50,07	50,05
	50,51	50,55	50,55	50,49	50,51	50,52
	53,59	53,57	53,57	53,68	53,67	53,62

3	49,76	49,82	49,74	49,79	49,81	49,78
	49,68	49,63	49,61	49,57	49,65	49,63
	54,30	54,34	54,31	54,29	54,30	54,31

4	50,47	50,46	50,5	50,41	50,41	50,45
	49,73	49,70	49,76	49,79	49,64	49,72
	54,54	54,49	54,38	54,42	54,50	54,47

5	50,38	50,44	50,3	50,34	50,36	50,36
	52,49	52,48	52,54	52,43	52,54	52,50
	54,66	54,65	54,64	54,60	54,62	54,63

6	51,06	51,00	51,10	51,01	51,04	51,04
	50,67	50,67	50,63	50,69	50,69	50,67
	53,11	53,14	53,13	54,11	53,11	53,32

7	51,17	51,10	51,10	51,07	51,03	51,10
	50,53	50,59	50,72	50,63	50,52	50,60
	53,20	53,23	53,18	53,15	53,21	53,19

8	50,38	50,39	50,44	50,47	50,41	50,42
	51,33	51,36	51,32	51,39	51,35	51,35
	53,18	53,22	53,21	53,17	53,16	53,19

Stanovení trvale deformace

MĚŘENÍ TLOUŠŤKY [mm] PO ZKOUŠCE

0 kGy

∅

1	50,87	50,52	50,85	50,71	50,77	50,74
	53,67	54,08	53,65	54,68	54,75	54,17
	23,07	23,06	23,07	23,13	23,18	23,10

2	52,44	52,90	52,57	52,52	52,43	52,57
	48,64	48,70	48,99	48,88	48,91	48,82
	23,51	23,25	23,18	23,17	23,27	23,28

3	52,01	50,99	51,17	51,17	50,95	51,26
	51,80	52,19	51,72	52,08	51,74	51,91
	23,25	23,19	23,12	23,19	23,24	23,20

4	50,80	50,72	50,88	51,27	50,94	50,92
	53,12	53,11	52,98	53,51	53,53	53,25
	23,14	23,20	23,16	23,10	23,09	23,14

5	52,16	52,20	52,10	20,10	20,12	39,34
	51,14	51,13	51,37	51,12	51,11	51,17
	23,29	23,24	23,08	23,14	23,11	23,17

6	51,13	50,43	50,46	50,74	50,70	50,69
	52,61	52,36	52,67	52,65	52,60	52,58
	23,14	23,15	23,07	23,16	23,15	23,13

7	52,13	52,26	52,23	52,10	52,21	52,19
	51,57	50,76	50,43	50,59	50,71	50,81
	23,42	23,41	23,39	23,31	23,43	23,39

8	52,12	52,48	52,68	52,38	52,28	52,39
	49,18	49,09	49,11	49,09	49,19	49,13
	23,22	23,20	23,19	23,12	23,16	23,18

99 kGy

∅

1	51,29	51,23	51,29	51,25	51,28	51,27
	54,04	52,11	52,00	52,06	52,09	52,46
	23,37	23,33	23,33	23,36	23,33	23,34

2	50,53	50,52	50,56	50,52	50,54	50,53
	51,20	51,33	51,19	51,23	51,31	51,25
	23,24	23,25	23,23	23,25	23,24	23,24

3	49,68	49,90	49,64	49,95	49,64	49,76
	51,93	51,94	51,90	51,81	51,95	51,91
	23,35	23,36	23,34	23,35	23,36	23,35

4	50,41	50,46	50,49	50,43	50,45	50,45
	51,15	51,19	51,22	51,19	51,20	51,19
	23,32	23,30	23,33	23,31	23,30	23,31

5	51,70	51,67	51,11	51,77	51,79	51,61
	50,30	50,28	50,25	50,32	50,15	50,26
	23,16	23,20	23,25	23,26	23,19	23,21

6	50,00	49,98	49,97	49,94	49,95	49,97
	51,34	51,36	51,59	51,31	51,30	51,38
	23,15	23,20	23,23	23,21	23,25	23,21

7	51,46	51,46	51,52	51,47	51,49	51,48
	50,83	50,87	50,80	50,85	50,85	50,84
	23,13	23,15	23,12	23,18	23,17	23,15

8	53,12	51,16	51,25	51,12	51,21	51,57
	50,54	50,52	50,90	50,61	50,48	50,61
	23,26	23,23	23,21	23,22	23,26	23,24

165kGy

∅

1	53,92	53,32	53,66	53,82	54,10	53,76
	51,02	51,29	50,88	50,82	51,07	51,02
	23,49	23,60	23,65	23,81	24,03	23,72

2	50,89	50,75	50,85	51,02	50,59	50,82
	53,65	53,55	53,48	53,56	53,27	53,50
	23,57	23,54	23,36	23,45	23,57	23,50

3	50,27	50,63	51,44	50,97	50,70	50,80
	52,70	52,39	52,27	52,28	52,00	52,33
	23,51	23,59	23,81	23,54	23,60	23,61

4	51,16	51,14	51,49	51,81	51,49	51,42
	53,01	52,79	52,96	52,73	53,03	52,91
	23,28	23,49	23,53	23,35	23,50	23,43

5	52,61	52,60	52,6	52,49	52,52	52,56
	52,77	52,87	53,08	52,81	52,92	52,89
	23,08	23,06	23,10	23,07	23,09	23,08

6	51,53	51,62	51,50	51,46	51,53	51,53
	52,24	52,20	52,19	52,10	52,07	52,16
	22,95	22,97	22,83	22,82	22,89	22,89

7	52,74	52,74	52,55	52,55	52,63	52,64
	51,24	51,27	51,27	51,21	51,20	51,24
	23,01	23,03	23,09	23,06	23,00	23,04

8	53,34	51,34	51,37	51,29	51,35	51,74
	53,27	53,64	53,25	53,69	53,50	53,47
	23,05	23,02	23,05	23,00	23,06	23,04

Vypočítané hodnoty
CC70[mm]

vzorek č.	1	2	3	4	5	6	7	8
0 kGy	57,34	56,67	56,41	57,11	56,96	56,92	56,25	56,38
100 kGy	53,94	54,44	55,43	54,34	54,62	53,20	54,31	53,46
165 kGy	56,75	56,17	56,53	56,98	57,76	57,07	56,69	56,70

PŘÍLOHA P VI: TRVALÁ DEFORMACE PŘI CYKLICKÉM NAMÁHÁNÍ

Trvala deformace při opakovaném stlačení 60x/min

MĚŘENÍ TLOUŠŤKY [mm]

PŘED ZKOUŠKOU

0 kGy

1	52,20	52,34	52,29	52,61	52,21
2	51,52	51,22	51,54	51,05	51,47
3	52,80	52,33	52,96	52,72	53,06

99 kGy

1	51,20	50,65	50,86	51,32	51,37
2	51,43	51,29	51,65	50,98	51,13
3	51,17	51,26	51,19	51,28	51,34

165kGy

1	52,44	52,46	52,59	52,62	52,36
2	52,84	52,79	52,65	52,59	52,68
3	52,13	52,19	52,21	52,16	52,09

PO ZKOUŠCE [mm]

0 kGy 1

51,50	50,50	52,10
-------	-------	-------

100 kGy 2

47,50	47,80	47,70
-------	-------	-------

165kGy 3

51,80	52,00	51,30
-------	-------	-------

0 kGy	PŘED[mm]	PO[mm]	Cf (%)
1	52,33	51,50	1,61
2	51,36	50,50	1,71
3	52,774	52,10	1,29

∅ **1,54**

99 kGy	PŘED[mm]	PO[mm]	Cf (%)
1	51,08	47,50	7,54
2	51,27	47,80	7,26
3	51,25	47,70	7,44

∅ **7,41**

165 kGy	PŘED[mm]	PO[mm]	Cf (%)
1	52,50	51,80	1,34
2	52,71	52,00	1,36
3	52,16	51,30	1,67

∅ 1,46