

Vliv beta záření na mechanické vlastnosti vybraných typů PC

Bc. Tomáš Jakeš

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. Tomáš Jakeš**

Osobní číslo: **T13482**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv beta záření na mechanické vlastnosti vybraných typů PC**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literální studie na dané téma
2. Příprava zkušebních těles pro experimentální část
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. David Mañas, Ph.D.**

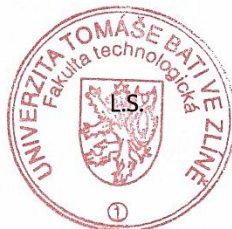
Ústav výrobního inženýrství

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 3.5.2015



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 nahlédnutí 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 užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

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

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je zjistit, jaký bude mít vliv ionizační záření na mechanické vlastnosti PC. Teoretická část se zabývá radiačním síťováním polymerů a dále pak metodikou měření tvrdosti. Jako metoda pro porovnání mechanických vlastností použitého PC byla zvolena metoda měření mikrotvrdosti DSI. Pomocí této metody je možné zjistit materiálové vlastnosti jako vtiskový modul, tvrdost, tečení, a další. V praktické části jsou tyto vlastnosti porovnávány na zkušebních tělesech, které byly modifikovány dávkami záření 33, 66, 99, 132, 165, 198 kGy s neozářenými zkušebními tělesy.

Klíčová slova: Modifikace polymerů, Beta záření, Radiační síťování, Polykarbonát, Tvrdost, Mikrotvrdost.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to find out what will be the effect of ionizing radiation on the mechanical properties of PC. The theoretical part deals with the radiation crosslinking polymers and then methodology for measuring hardness. As a method for comparing the mechanical properties of PC were chosen method of measuring microhardness DSI. Using this method it is possible to detect material properties, indentation modulus, hardness, creep, and others. In the practical part, these properties are compared with test specimens that have been modified doses of radiation 33, 66, 99, 132, 165, 198 kGy irradiated test specimens.

Keywords: Modification of polymers, Beta rays, Radiation cross-linking, Polycarbonate, Hardness, Microhardness.

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. David Mañas, Ph. D. za odborné vedení, cenné rady, obětavý přístup a hlavně za čas, který věnoval mojí diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého mého studia.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	11
1.1 POLYKARBONÁT.....	12
1.1.1 Vlastnosti.....	13
1.1.2 Použití	13
2 MODIFIKACE POLYMERŮ	15
2.1 FYZIKÁLNÍ MODIFIKACE	15
2.2 MECHANOCHEMICKÁ MODIFIKACE.....	15
2.3 CHEMICKÁ MODIFIKACE	16
2.4 MODIFIKACE IONTOVÝM OZAŘOVÁNÍM.....	16
3 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	18
3.1 ZÁŘENÍ ALFA.....	19
3.2 ZÁŘENÍ BETA.....	20
3.3 ZÁŘENÍ GAMA	21
3.4 VELIČINY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	22
4 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ	24
4.1 ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY STAVBY SÍTÍ.....	24
4.2 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ	26
4.2.1 Technologie ozařování beta zářením	28
4.2.2 Technologie ozařování gama zářením	30
5 TVRDOST	32
5.1 STATICKÉ INDENTAČNÍ ZKOUŠKY TVRDOSTI	32
5.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella	32
5.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	33
5.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	34
5.1.4 Zkouška tvrdosti podle Knoopu	35
5.2 ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI	37
5.3 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI (DSI)	37
5.3.1 Indentační křivky	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	43
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	44
7.1 VLASTNOSTI POUŽITÉHO MATERIÁLU.....	44
7.2 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	44
7.2.1 Parametry vstříkovaní	46
7.3 OZAŘOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	46
7.4 LEŠTĚNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	47
8 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI	49

8.1	TVRDOMĚR MICRO-COMBI TESTER.....	49
9	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	51
9.1	MĚŘENÉ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY	51
9.2	STATISTICKÉ VZTAHY	51
9.3	VTISKOVÁ TVRDOST H_{IT}	52
9.3.1	Grafické znázornění hodnot vtiskových tvrdostí	52
9.4	VTISKOVÝ MODUL E_{IT}	54
9.4.1	Grafické znázornění hodnot vtiskových modulů	55
9.5	VTISKOVÉ TEČENÍ (CREEP).....	57
9.5.1	Grafické znázornění hodnot vtiskového tečení (Creep).....	57
9.6	DEFORMAČNÍ PRÁCE	59
9.6.1	Grafické znázornění hodnot deformace	59
9.7	INDENTAČNÍ KŘIVKY	62
10	DISKUSE VÝSLEDKŮ	66
10.1	VTISKOVÁ TVRDOST.....	66
10.2	VTISKOVÝ MODUL.....	67
10.3	VTISKOVÉ TEČENÍ	67
10.4	POROVNÁNÍ MIKRO-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	68
	ZÁVĚR	70
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	71
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	75
	SEZNAM TABULEK.....	77
	SEZNAM PŘÍLOH.....	78

ÚVOD

V současné době je velkým trendem nahrazování kovových materiálů polymerními, a proto jsou na ně kladeny stále větší nároky nejen na kvalitu a jakost, ale i na výrobní technologie, materiály, nástroje apod. Polymerní materiály jsou tak používány díky svým výjimečným vlastnostem, snadnému zpracování a ceně. Proto dochází k vývoji nových metod za účelem zlepšování jejich vlastností. Jednou z možností zlepšování vlastností je radiační síťování za pomoci ionizačního záření, které zlepšuje mechanické, tepelné a i chemické vlastnosti, přičemž celý proces síťování probíhá bez tepelného či mechanického zatížení. Díky tomu je možné namísto nákupu dražších materiálů použít technologii radiačního síťování a dosáhnout tak obdobných vlastností, a to i za použití cenově dostupnějšího materiálu. Avšak, tato metoda nefunguje u všech polymerních materiálů zlepšením vlastností. U řady polymerních materiálů má negativní účinek tím, že způsobuje jejich degradaci. Řada polymerních či kompozitních materiálů ještě nebyla otestována vlivu ionizačního záření. Některé poznatky v této oblasti zůstávají dosud nevysvětleny, proto každý nový poznatek o vlivu ionizačního záření může přispět k lepšímu pochopení dané problematiky a může tak rozšířit možnosti použití.

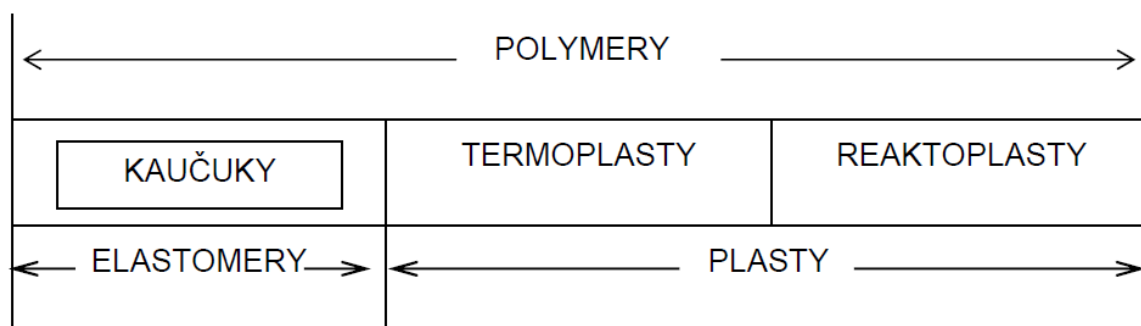
Tato diplomová práce se zabývá problematikou vlivu beta záření na povrchové vlastnosti polymerního materiálu a má rozhodnout zda je to při dané aplikaci výhodné či nikoliv. V praktické části byl použit zkušební materiál PC (Makrolon 2207), modifikován různými dávkami záření. Ozářené zkušební tělesa byla otestována zkouškou mikrotvrdomosti při různých zatíženích indentoru, a to 0,5; 1 a 5 N. Naměřené výsledky byly vyhodnoceny a porovnány za pomoci grafů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymery jsou chemické látky se svými specifickými vlastnostmi, které obsahují ve svých obrovských molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku, chloru a nespočet jiných prvků. Tyto makromolekuly jsou navzájem propojeny a tvoří tzv. řetězce. Polymerní materiály se dělí do dvou základních skupin (Obr. 1): [1]

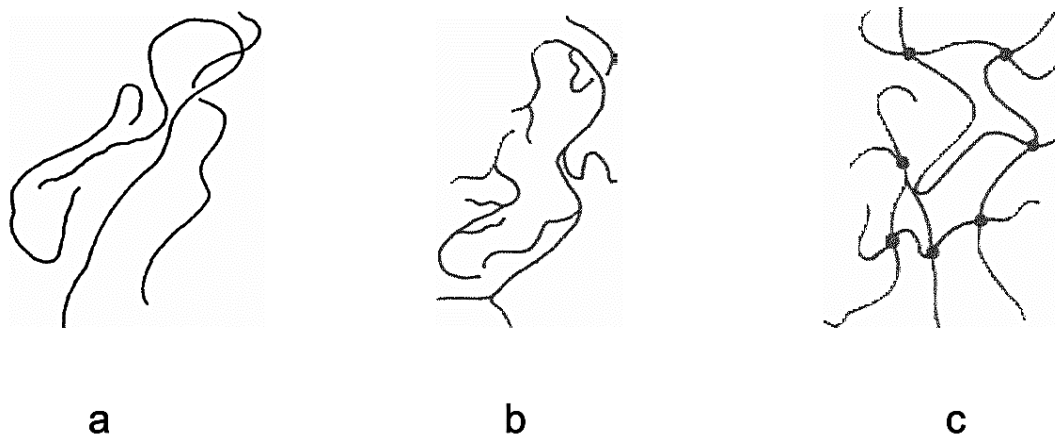
- **Elastomery** – jde o vysoce elastický materiál, který i při zatížení malou silou vykazuje velké deformace a to bez porušení, přičemž tato deformace je převážně vratná. Nejznámější a nejpočetnější podmnožinou elastomerů jsou kaučuky.
- **Plasty** – jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často však křehké. Za zvýšené teploty se stávají plastickými a tvarovatelnými. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu vratná (opakovatelná), jde o skupinu plastů nazývanou termoplasty. Pokud je změna nevratná, dojde při této změně k chemické reakci (často probíhající za zvýšené teploty), jedná se o skupinu reaktoplastů. [1]



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

[1]

Řetěze tvoří homogenní kontinuum, nýbrž mikroheterogenní systém, který má rozdílné vlastnosti v jednotlivých mikroobjemech. Tyto systémy tvoří nadmolekulární prostorové jednotky (lamely, sféolity, fibrily, globuly, aj.). Pomocí typů nadmolekulárních řetězců, se dělí na lineární, rozvětvené nebo uspořádané do prostorové sítě (Obr. 2). [1], [4]



Obr. 2 Schematické znázornění makromolekul [1]

a – lineárního, b – rozvětveného, c – sesíťovaného

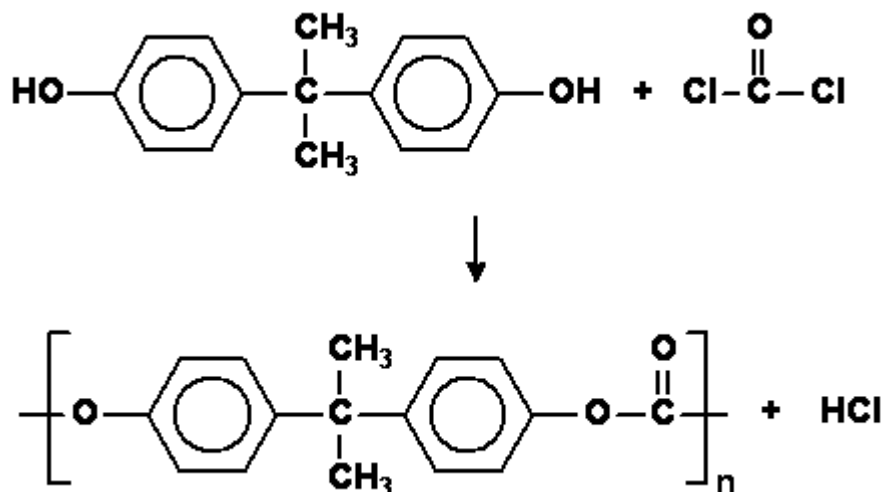
Na rozdíl od nízkohustotních látek, je pro polymery charakteristický přechodový stav mezi sklovitým a kapalným, tzv. stav kaučukovitý. V tomto fázovém stavu je polymer deformovatelný, a to do neobvyklé míry. Takže jej nelze definovat jako tuhou látku, ale ani jako kapalinu, protože při deformaci nedochází k nevratnému toku, který charakterizuje stav plastický – kapalný. Z toho vyplývá, že polymery mohou existovat ve čtyřech různých fázových stavech:

- krystalickém,
- amorfním:
 - o sklovitém,
 - o kaučukovitém,
 - o plastickém.

O tom v jakém z těchto stavů se polymer nachází za běžných podmínek a jak je široké teplotní rozmezí existence těchto stavů, rozhoduje především chemické složení a molekulová hmotnost makromolekulární látky. [1]

1.1 Polykarbonát

Tento termoplastický materiál spadá do skupiny polyesterů, ve které tvoří kyselou složku kyselina uhličitá. Alkoholickou složku tvoří převážně aromatické dvojfunkční alkoholy. Vznik polykarbonátu syntézou znázorňuje schéma na obrázku 3. [2]



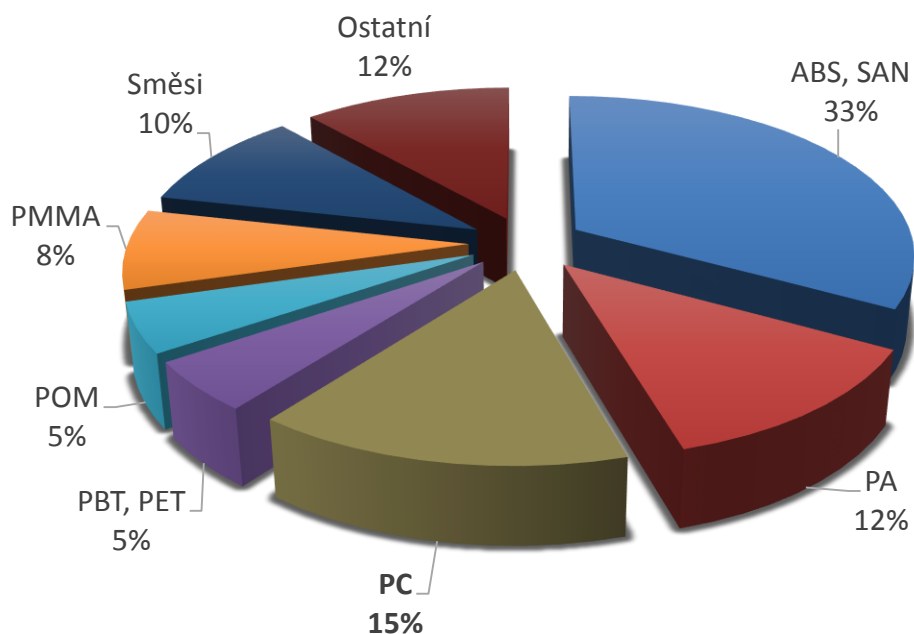
Obr. 3 Syntéza polykarbonátu [2]

1.1.1 Vlastnosti

Jedná se o amorfní, průhledný termoplast se střední pevností, tuhostí a také výbornou houževnatostí. Tvarová stálost za tepla je až 140°C, trvalá teplotní odolnost je do 100°C, v horké vodě však jen do 70°C. Vyznačuje se dobrými elektrickými vlastnostmi, avšak odolává jen slabým kyselinám, olejům, alkoholu a benzínu. Neodolává silným kyselinám, zásadám, většině rozpouštědel a horké vodě. [2]

1.1.2 Použití

Polykarbonát patří do skupiny tzv. konstrukčních polymerů. V porovnání s ostatními plasty jsou jeho vlastnosti středně dobré. Používá se pro tělesa a kryty strojů na maso a zeleninu, nádoby do kávovarů a mixérů, tělesa injekčních stříkaček, nerozbitné průhledné kryty světlíků automobilů a dopravní značky. Dále pak součástky pro elektroprůmysl, např. telefony, stěny televizorů, kostry cívek, vypínače, součásti psacích strojů a počítačů. [2]



Obr. 4 Světová spotřeba konstrukčních termoplastů (r. 2010) [3]

Tab. 1 Světová spotřeba termoplastů (Evropa, Severní Amerika a Asie) [3]

Typ plastu	r. 1990 [mil. tun]	r. 2010 [mil. tun]	odhad r. 2016 [mil. tun]	meziroční nárůst (2010-2016)
PE-LD	18,8	39,2	49,2	3,9%
PE-HD	11,9	34,9	45,4	4,5%
PP	12,9	50,9	68,3	5,0%
PVC	17,7	35,1	44,2	3,9%
PS	7,2	10,8	13,7	4,0%
EPS	1,7	5,2	7,0	5,1%
ABS, ASA, SAN	2,8	7,3	9,1	3,7%
PA	1,0	2,6	3,5	5,1%
PC	0,5	3,4	4,6	5,2%
PET	1,7	15,5	20,8	5,0%
PUR	4,6	11,9	15,1	4,0%
Ostatní termoplasty	2,8	8,3	10,9	4,6%
Celkem	83,6	225	292	4,4%

2 MODIFIKACE POLYMERŮ

Jedná se o záměrné změny vlastností polymerů, za účelem zlepšení či změny původních vlastností. Modifikace polymerů je velmi široký pojem, do kterého patří nespočet způsobů fyzikálních a chemických přeměn polymerů. Stále náročnější požadavky různých odvětví průmyslu na lepší vlastnosti plastových dílů, nutí tuto oblast modifikací k rozvoji. Metody modifikací polymerů lze rozdělit na tři základní způsoby. [1]

2.1 Fyzikální modifikace

Nejjednodušší způsob, který nabývá stále širšího uplatnění. Jedná se o mechanické smíchání dvou nebo více polymerů, čímž lze mnohdy získat směsi s vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Tímto způsobem se modifikující látky do polymerních řetězců nezabudovávají, ale zůstávají dispergovány ve hmotě polymerů. Mezi tyto modifikace patří:

- **Smíchání dvou a více polymerů** – velmi jednoduchá metoda, která mnohdy vede k výraznému zlepšení mechanických vlastností vzniklé směsi.
- **Použití přísad** – tyto přísady ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti polymerů. Polymerní makromolekulární látka plní funkci pojiva a určuje základní vlastnosti konečné směsi. Přísady mohou být organické nebo anorganické podstaty. Jsou to plniva, stabilizátory, barviva, maziva, iniciátory, změkčovadla, nadouvadla, tvrdidla, retardéry hoření, apod. [1]

2.2 Mechanochemická modifikace

Při této modifikaci polymerů dochází k reakci aktivních částic, které vznikají při mechanické destrukci makromolekulárních řetězců. Používá se při ní dvou základních metod:

1. **Mechanická degradace směsi polymerů** – vznikají modifikované polymery kombinací makroradikálů, eventuálně reakcí makroradikálů s mechanicky aktivovanými polymerními řetězci.
2. **Mechanické degradaci polymeru v přítomnosti monomeru** – zde vznikající makroradikály iniciují polymeraci přítomného monomeru.

U obou těchto metod probíhá řada reakcí, které vedou mimo jiné ke vzniku roubovaných nebo blokových kopolymerů, lišících se strukturou a délkou bloků. Výsledný produkt ze strukturního hlediska není zdaleka jednotný ani jednoznačně definovatelný. [1]

Do této skupiny modifikací patří také tzv. plastikace kaučuku, což je hnětení na dvouválcích, nebo na hnětacích strojích. Touto operací se příliš velké kaučukové makromolekuly štěpí na menší tím, že makroradikály vzniklé intenzivním hnětením se zakončí vzdušným kyslíkem nebo radikály vzniklými z plastikačních činidel. To má za následek pokles střední molekulové hmotnosti kaučuku, tedy se lépe zpracovává. [1]

2.3 Chemická modifikace

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

- reakce probíhající za zachování střední molekulové hmotnosti polymeru, které se nazývají polymeranalogické přeměny,
- reakce vedoucí ke změnám střední molekulové hmotnosti polymeru, k nimž patří i reakce probíhající při mechanochemické modifikaci. Tato reakce probíhá při sítování polymerů. [1]

2.4 Modifikace iontovým ozařováním

Modifikace iontovým ozařováním spadá do skupiny chemických modifikací a má své jisté výhody i nevýhody. Při obou těchto modifikacích probíhají podobné chemické reakce. Avšak u chemické je nutné navíc zabezpečit přítomnost účinných látek, často také reakčních podmínek (např. teplo).

Výhody této technologie oproti chemické:

- rychlejší proces,
- úspora energie (netřeba ohřevu),
- menší náchylnost na vlhkost,
- lepší čistota modifikovaného polymeru,
- méně těkavých organických sloučenin,
- nízká toxicita z důvodu absence rozpouštědel. [4]

Tato modifikace má však i nevýhody, a to jsou:

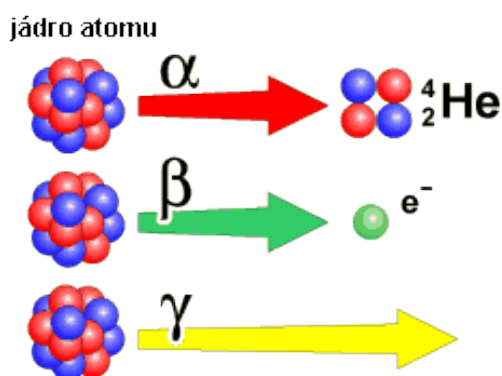
- dražší zařízení - proto jsou nutné vyšší kapitálové investice,
- v některých případech užití se vlastnosti zhoršují,
- výrobce materiálů musí změnit výrobní proces a zařadit do něj tuto operaci. [4]

3 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Jedná se o souhrnné označení záření, které mají takovou energii, která je postačující k ionizaci atomů nebo molekul ozařované látky. A to může být přímo, nebo prostřednictvím sekundárního záření. Ionizující záření lze dělit na:

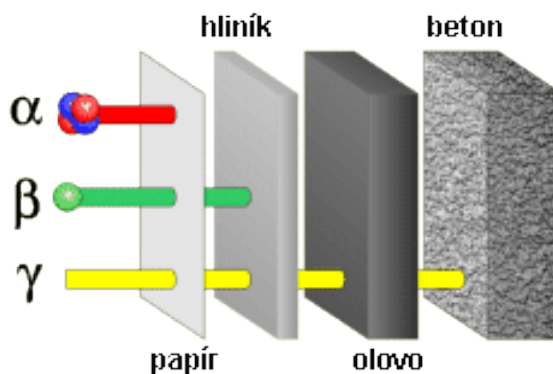
- **přímo ionizující záření** je tvořeno nabitými částicemi (elektrony, pozitrony, protony, částicemi alfa apod.), jejich kinetická energie je dostatečně velká k tomu, aby vyvolala ionizaci,
- **nepřímo ionizující záření** je tvořeno nenabitými částicemi (fotony, neutrony), které vzhledem k tomu, že nemají elektrický náboj, nemohou ionizovat. Pokud procházejí nenabitými částicemi látkou, pak při interakci s atomy této látky uvolňují v ní nabitě částice nebo způsobí jadernou přeměnu provázenou emisí už přímo ionizujícího záření.

[5]



Obr. 5 Druhy ionizujícího záření [6]

Ionizující záření lze rozdělit z jiného hlediska, a to na korpuskulární záření, které je představováno proudem částic (záření alfa, beta, neutronové záření apod.) a na elektromagnetické (záření gama, rentgenové záření X). [5]



Obr. 6 Pronikavost ionizujícího záření [6]

3.1 Záření alfa

Jde o přímo ionizující záření tvořené částicemi alfa (jádra helia). Tyto částice mají klidovou hmotnost $6,656 \cdot 10^{-27}$ kg a nesou dva elementární kladné náboje. Dosahují rychlosti řádově 10^7 m·s⁻¹ a jejich energie leží v rozmezí 4 MeV a 9 MeV. Vztah mezi energií alfa částic a přeměnovou konstantou udává Geiger-Nuttalův vztah:

$$\ln \lambda = A + B \cdot \ln E_{\alpha} \quad (1)$$

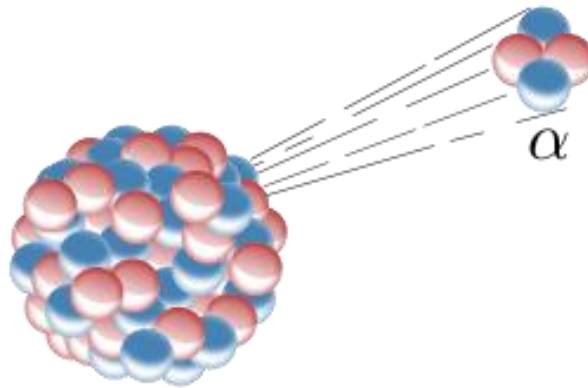
Kde: A, B – konstanty

λ – přeměnová konstanta (vyjadřuje pravděpodobnost jaderné přeměny)

E_{α} – energie alfa částic

Ze vztahu (1) vyplývá, že energie emitovaných alfa částic je o to větší, čím se radionuklid rychleji rozkládá.

Průchod alfa částic hmotným prostředím vyvolá ionizaci. Částice vytváří při srážkách s atomy kladné a záporné ionty (vyráží z elektronového obalu elektron). Při vytvoření jednoho páru iontů ve vzduchu, ztratí alfa částice energii 32,5 eV. Jsou schopné tedy vytvořit na své doletové dráze řádově 10^5 párů iontů. Dosah tohoto záření je díky tomu velmi omezen. Ve vzduchu projdou pouze několik milimetrů, ve vodě či v tkáni jenom zlomky milimetrů. Zdrojem záření jsou nejčastěji těžké radionuklidy, jako například ²²⁶Ra, ²³⁹Pu a ²⁴¹Am. [5], [17]



Obr. 7 Částice alfa [18]

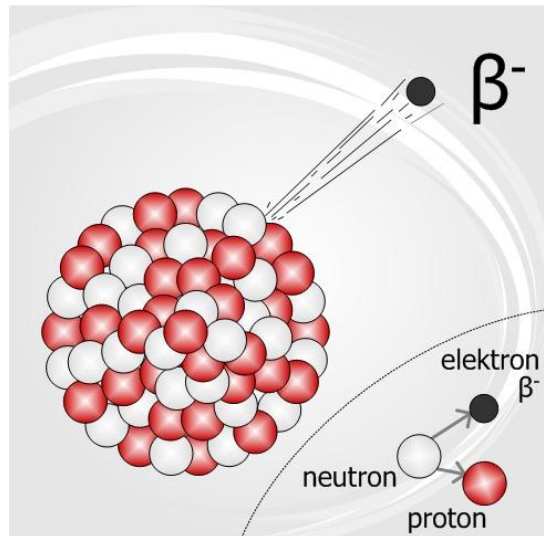
3.2 Záření beta

Tento typ ionizačního záření je tvořen rychlými elektrony nebo pozitrony se značným rozsahem energií (až 16,6 MeV). Elektrony jsou z jádra emitovány při samovolné přeměně jaderného neutronu na proton, elektron a antineutrino. Beta záření obsahuje částice s energiemi od nuly až po určitou maximální energii, která je specifická pro daný nuklid. Je tedy možné říci, že tvoří spojité energetické spektrum. [5], [17]

Při průchodu beta částic prostředím mohou nastat tyto jevy:

- **elastický (pružný) rozptyl** – díky elektrickým silám dochází k rozptylu beta záření jak na elektronech v obalu, tak na atomových jádrech. To má za následek změnu směru beta záření. Tento rozptyl se uplatňuje hlavně u nízkoenergetických (pomalých) elektronů,
- **ionizace** – má za následek ztrátu energie, ionizační schopnost beta záření je výrazně nižší než ionizační schopnost u alfa záření,
- **brzdné záření** – při brzdění letících elektronů (beta záření) průchodem elektrickým polem jádra, vzniká brzdné rentgenové záření (stejný jev jako vznik rentgenova záření v RTG – lampách). Díky tomu vzniká elektromagnetické záření s podstatně větší pronikavostí. [17]

Oproti alfa záření jsou částice beta záření relativně menší a mnohem lehčí. A díky tomu se pohybují při stejné energii mnohem rychleji. Při průchodu prostředím daleko méně ionizují, díky tomu mají mnohem větší dosah. Ve vzduchu je dosah beta záření v řádech metrů, ve vodě nebo tkáni až desítky milimetrů a u těžších materiálů desetiny až jednotky milimetrů. [5], [17]



Obr. 8 Beta záření [18]

3.3 Záření gama

Elektromagnetické záření se skládá z emitovaných fotonů s velmi krátkou vlnovou délkou v řádu 10^{-11} až 10^{-13} m. Toto záření vzniká při jaderných reakcích nebo radioaktivním rozpadu přechodem jádra z vyšší do nižší energetické hladiny, kdy se zároveň jádro zbavuje své excitační energie. Gama záření je obvykle doprovázeno alfa nebo beta zářením. Čistých gama zářičů je velmi málo. [5], [17]

Energie fotonů záření je dána vztahem:

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

kde: h – Planckova konstanta ($6,64 \cdot 10^{-34}$ J·s)

c – rychlost elektromagnetického záření ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹)

λ – vlnová délka záření [17]

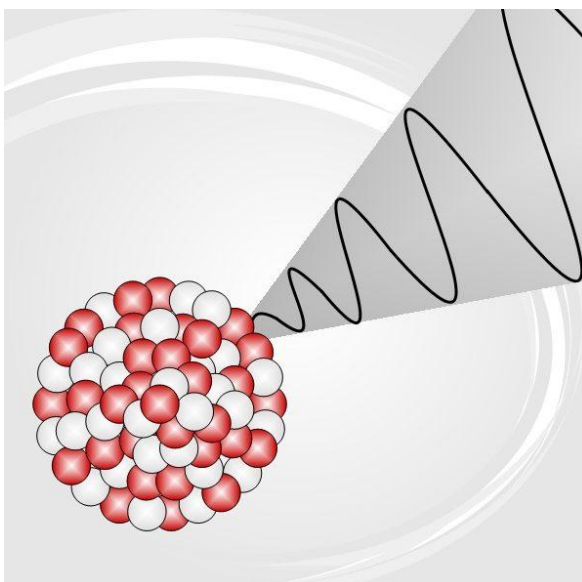
Záření gama má čárové spektrum, to znamená, že daný radionuklid emituje pouze fotony s určitými energiemi, které jsou pro jeho přeměnu charakteristické. Při průchodu prostředím uvolňuje záření gama elektricky nabitě částice a dodává jim energii potřebnou k tomu, aby mohly ionizovat a excitovat. Jedná se tedy o nepřímo ionizující záření a může vyvolat tyto tři interakce:

1. **Fotoefekt** – foton (gama záření) předá veškerou energii elektronu v atomovém obalu a je-li tato energie větší než výstupní práce elektronu, elektron se z obalu uvolní. Tento efekt lze prakticky považovat za pohlčení záření. Pravděpodobnost, že k tomu

jevu dojde, se zmenšuje s rostoucí energií gama záření a roste s atomovým číslem materiálu.

2. **Comptonův rozptyl** – jde o interakci záření s volnými nebo jen velmi slabě vázanými elektrony na rozdíl od fotoefektu, kde se jednalo o interakci s pevně vázaným elektronem. Foton gama záření předá část své energie (narazí do něj) a posune ho.
3. **Tvorba párů elektron + pozitron** – k tomuto jevu dochází, je-li energie gama záření větší než 1,02 MeV. Za určitých podmínek může být zcela pohlcen v elektrickém poli atomového jádra a tím vznikne dvojice elektron a pozitron.

K nejčastěji používaným zdrojům gama záření patří ^{60}Co a ^{137}Cs . Dosah gama záření je ve vzduchu řádově několik desítek metrů a v kompaktních materiálech je jeho dosah až v desítkách centimetrů. [5], [17].



Obr. 9 Záření gama [18]

3.4 Veličiny ionizujícího záření

- **Kinetická energie elektronu** – jelikož je kinetická energie ionizačního záření a záření všeobecně velmi malá, používá se místo jednotek joule jednotka elektronvolt (eV). Jeden elektronvolt odpovídá kinetické energii, kterou získá elektron urychlený ve vakuu napětím jednoho voltu. [9]

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (3)$$

- **Absorbovaná dávka D** – je energie ionizujícího záření absorbované v jednotce hmotnosti ozařované látky v určitém místě. Jednotkou absorbované dávky je joule na kilogram. Pro zjednodušení byl zaveden název veličiny gray (Gy). [10]

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (4)$$

- **Dávkový příkon** – jedná se o poměr přírůstku dávky za časový interval. Jednotkou je $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ nebo také $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$. [10]

$$1 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (5)$$

4 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ

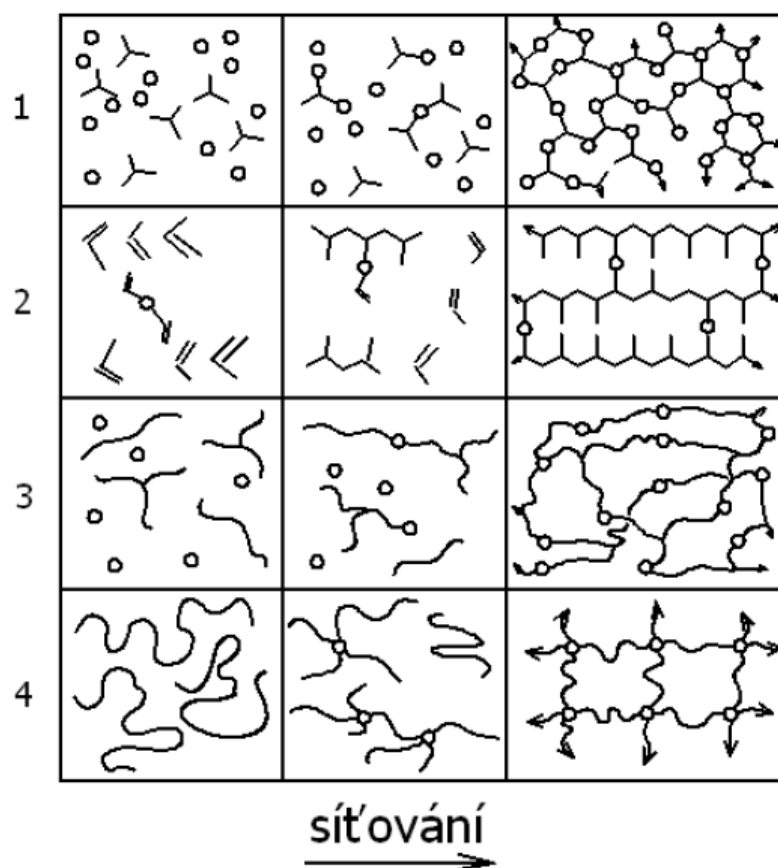
Síťování je proces při, kterém vznikají spoje mezi makromolekulami polymerních řetězců, nejčastěji pomocí kovalentních vazeb a vzniká tak trojrozměrná prostorová síť. [4]

Síťování lineárních polymerů je charakteristické pro kaučuky, kde se hovoří o vulkanizaci. V poslední době se však síťování průmyslově uplatňuje i u jiných polymerů, např. polyethylenu, polypropylenu a polyvinylchloridu, kterým tento proces propůjčuje některé výhodné vlastnosti, jak již bylo zmíněno. [3]

4.1 Základní způsoby stavby sítí

Při chemickém spojování dvoufunkčních jednotek vznikají lineární polymery. V případě, že je jedna z jednotek více než dvoufunkční, dochází v průběhu reakce k tzv. větvení, které vytvoří trojrozměrnou kontinuální strukturu. Procesy, kterými vznikají vazby (sítě) mezi molekulami polymerů jsou (Obr. 10):

- 1) Postupnými reakcemi nízkomolekulárních látek. Polyadiční či polykondezační reakce umožňují vznik např. epoxidové a fenolové pryskyřice. Jejich síť se ještě může vytvrdit.
- 2) Polymerační řetězovou reakcí nebo také síťovací polymerací. Jeden z příkladů je kopolymerace styrenu s divinylbenzenem a vznikají hmoty použitelné pro měniče iontů.
- 3) Spojováním reaktivních konců nízkomolekulárních polymerů, jejichž molární hmotnosti jsou řádu $10^3 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Tento proces je velmi podobný jako první proces.
- 4) Zavedení příčných vazeb do vysokomolekulárních polymerů. Příkladem je vulkanizace pryže nebo ozáření už zesíťovaného polyethylenu. [12]



Obr. 10 Schéma vzniku sítě [12]

1 – polykondenzace nebo polyadice nízkomolekulárních látek, 2 – síťující kopolymerace,
3 – spojování reaktivně, 4 nahodilé síťování vysokomolekulárních polymerů

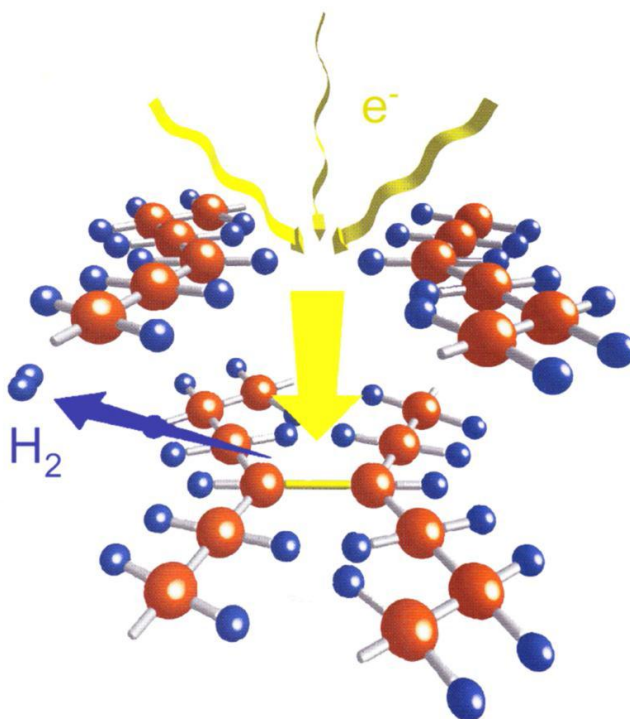
Ve všech čtyřech případech probíhají při síťování tyto děje:

- v první řadě vzrůstají rozměry molekul spolu s polydisperzitou celého systému,
- v určité fázi procesu dospěje systém do tzv. bodu gelace, ve kterém vzroste molární hmotnost natolik, že začne vznikat nekonečná struktura neboli gel,
- nad bodem gelace se v systému nachází dvě části: nekonečná struktura (gel) a molekuly konečné velikosti (sol), které je možné oddělit extrakcí,
- v další fázi reakce postupně obsah solu klesá a jeho molární hmotnost a polydisperzita klesá,
- dále v gelu vznikají tzv. elasticky aktivní řetězce, které při deformaci přenášejí napětí a určují pevnost gelu a jeho rovnovážný stupeň nabobtnání. [12]

4.2 Radiační síťování polymerů

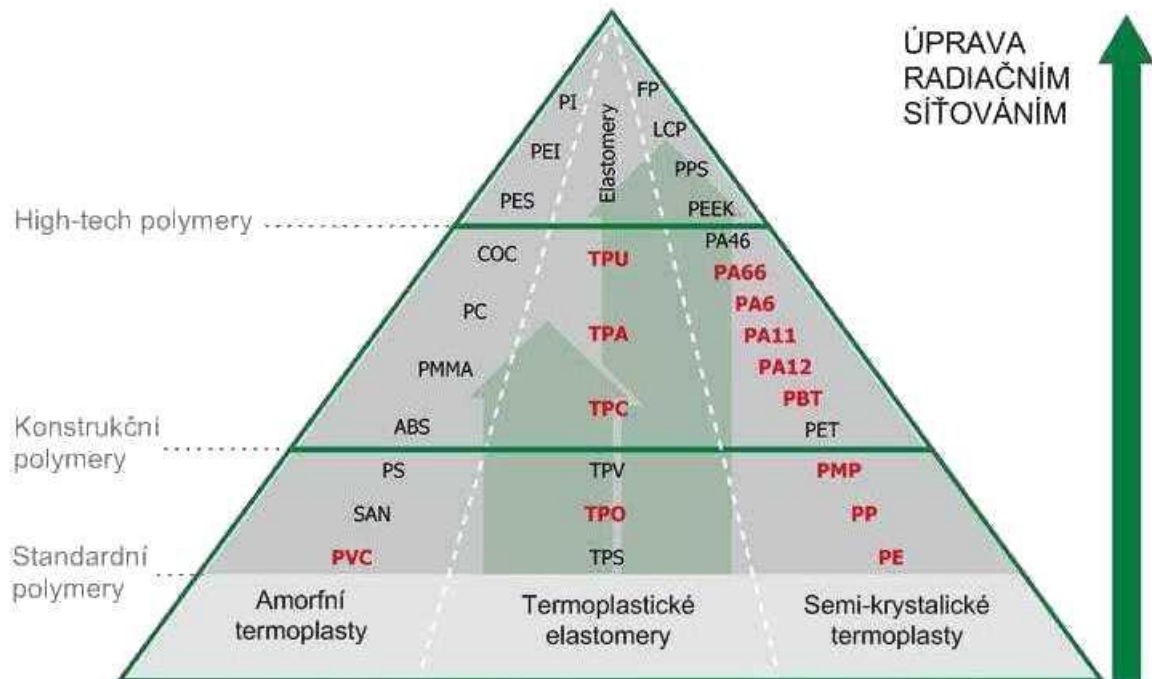
Radiační síťování polymerů je proces, kterým lze v polymerních materiálech vytvořit další vazby mezi polymerními řetězci. Nejčastěji pomocí kovalentních vazeb, a tím zlepšit jejich mechanické, tepelné i chemické vlastnosti. Materiál je při tomto procesu vystaven ionizujícímu záření za přítomnosti vzniku volných radikálů. Základním předpokladem radiačního síťování je, že při působení ionizačního záření dochází převážně k síťování, a ne ke štěpení makromolekul tedy k degradaci. Oba tyto procesy probíhají paralelně. [7], [16]

To, který z procesů převažuje, závisí na chemické struktuře polymeru, kde vodíkově-uhlíkové polymery se strukturou $-\text{CH}_2-\text{CHR}-$ převážně síťují a polymery se strukturou $-\text{CH}_2-\text{CR}_1\text{R}_2-$ zase naopak degradují. Označením R_1 , R_2 je pro radikály, které nejsou ani vodíkové ani halogenové atomy. Velikost změny vlastností udává především velikost dávky, která ozařuje materiál, ale i samotný ozařovaný materiál. Degradace vlivem ionizačního záření se děje převážně u polypropylenu, polytetrafluoretylenu a dalších. [7], [16]



Obr. 11 Princip radiačního síťování [16]

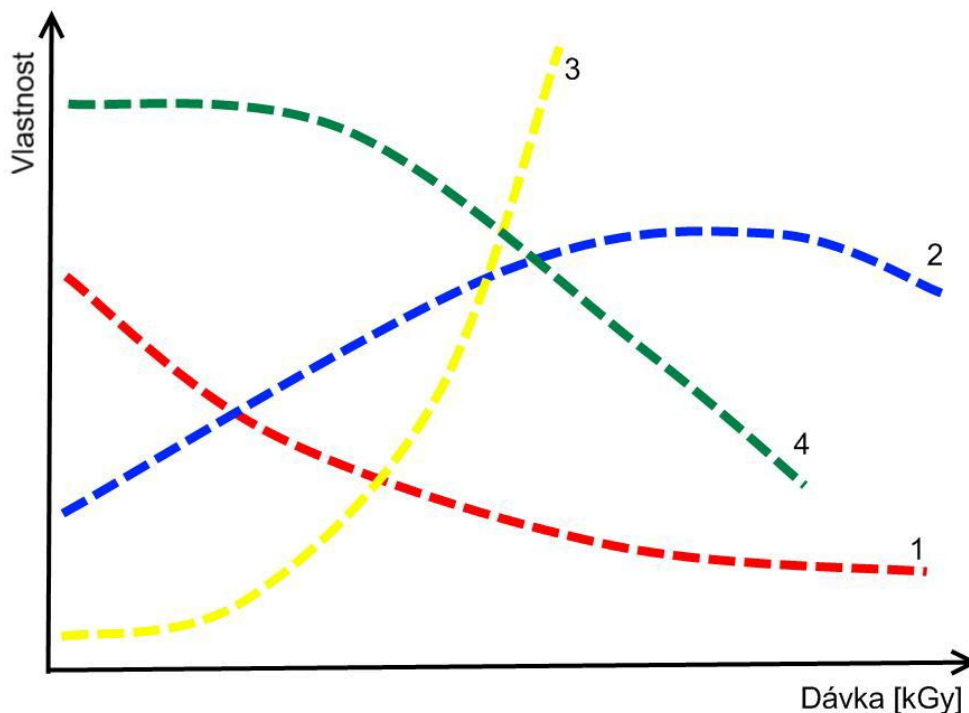
Vlivem záření dochází u některých polymerů ke snížení indexu toku taveniny. Tento efekt je výhodný u vstřikování, díky němu je možné zkrátit dobu cyklu a urychlit tak výrobu daného dílce. Tato metoda při správné aplikaci umožňuje vysokou flexibilitu při volbě surovin. [7]



Obr. 12 Radičně síťovatelné polymery [7]

Radiační síťování umožňuje změnu těchto vlastností:

- Mechanické vlastnosti** – narůst Youngova modulu pružnosti, nárůst tvrdosti, zvýšení pevnosti, zlepšení ořezuvzdornosti, redukce tečení (creepu), zvýšení meze únavy.
- Chemické vlastnosti** – snížení rozpustnosti, zvýšená odolnost proti olejům a hydrolyze, vyšší odolnost vůči vnitřnímu pnutí a redukce šíření trhlin.
- Tepelné vlastnosti** – zvýšená tvarová stálost a pevnost za tepla, vyšší odolnost vůči stárnutí, snížení teplotní roztažnosti. [7], [16]

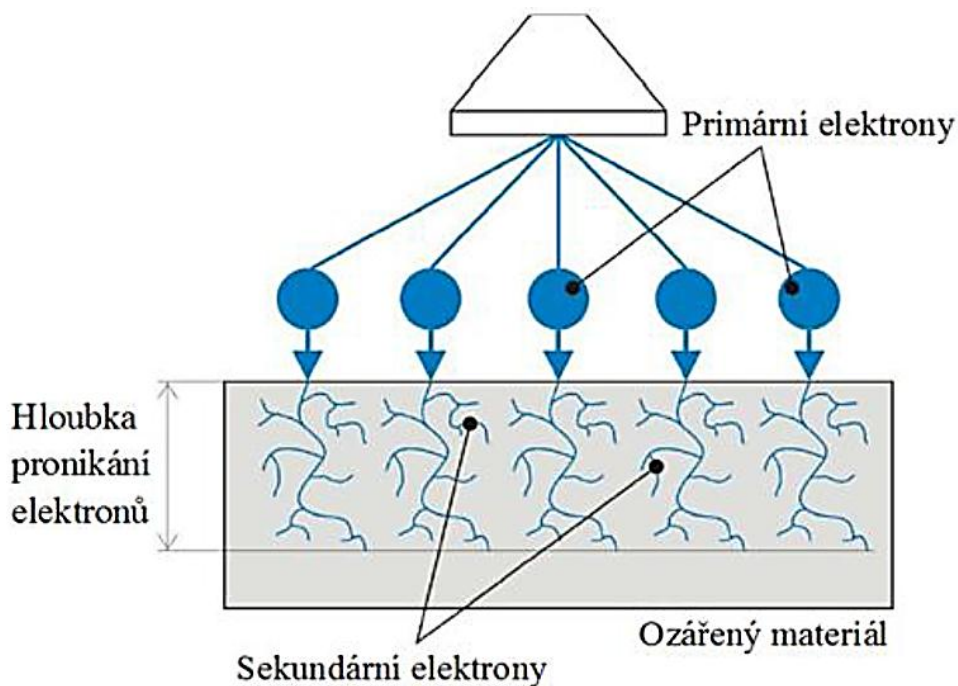


Obr. 13 Vybrané vlastnosti plastů v závislosti na velikosti dávce ozáření [7]

1 – tažnost, 2 – pevnost v tahu, 3 – tvarová stálost (za tepla), 4 - botnání

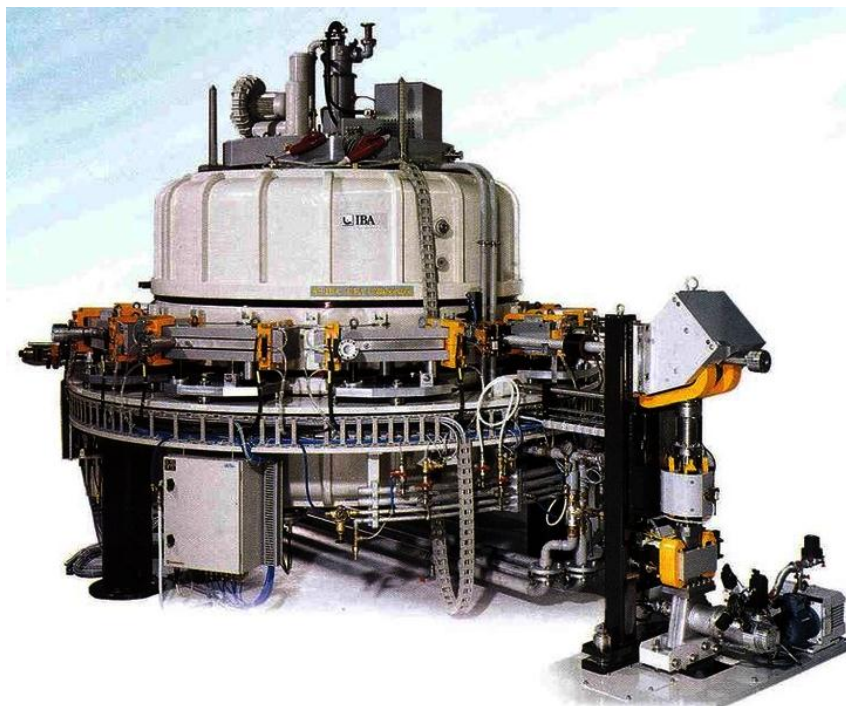
4.2.1 Technologie ozařování beta zářením

Umělé beta záření může vzniknout pomocí urychlovače částic a to buď lineárního, nebo i kruhového (cyklického). Princip lineárních elektronových urychlovačů je podobný jako u Braunovy trubice, která se dříve používala v televizorech pro přenos obrazu. Pomocí vysokého napětí dojde k nažhavení katody, čímž se emitují elektrony, které jsou urychlovány ve vysokém vakuu za pomoci elektromagnetického pole. Aby bylo zabráněno elektrickým výbojům, je nutné, aby tento děj probíhal uvnitř tlakové nádoby naplněné izolujícím plynem. Tento urychlovač je schopný vyzařovat elektrony s energií maximálně 5 MeV. Pro vyšší výkony se používají cyklické urychlovače, které dosahují až 10 MeV. [7]



Obr. 14 Sítování pomocí beta záření [16]

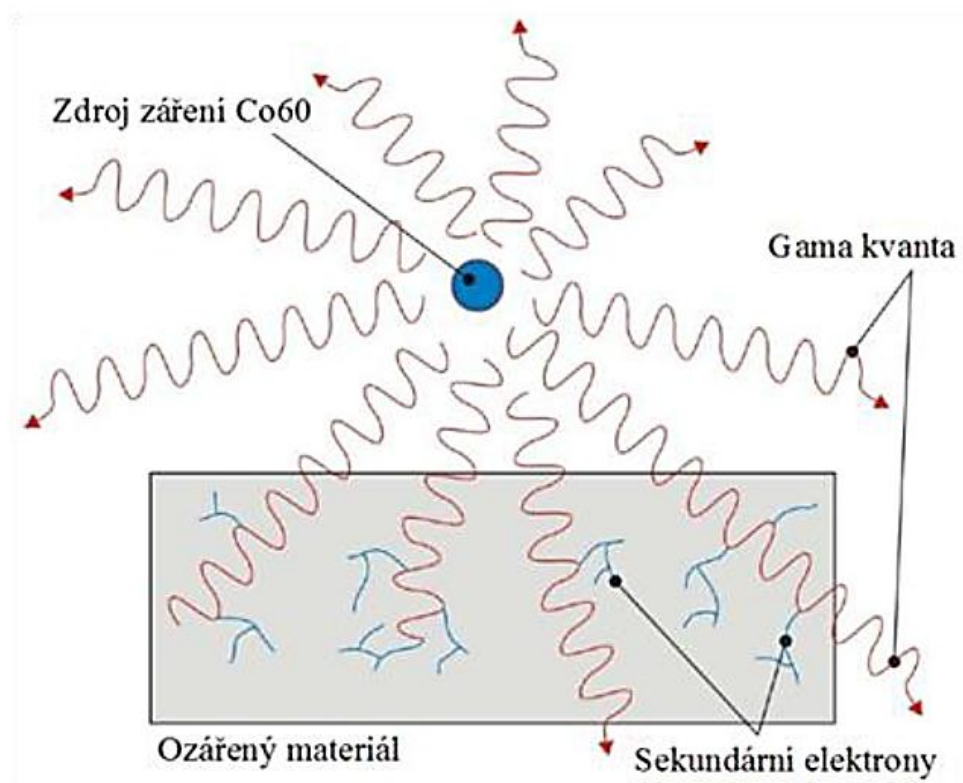
Tyto elektronové urychlovače jsou schopné pracovat s vysokými dávkami záření, avšak s omezenou penetrační hloubkou, kterou udává kinetická energie vyslaných elektronů. Dle velikosti energie vyslaných elektronů se urychlovače dělí na nízko, středně a vysoce energetické. Pro zlepšení hloubky vniknutí ionizačního záření a celkové hospodárnosti procesu se používá ozařování ze dvou stran. Doba procesu ozařování trvá v rádech sekund a je možné ozařovat výrobky zabalené v krabicích, musí však být zaručena rovnoměrnost ozařování. Dále je možné ozařovat i sypký materiál, který je dopravován na pásu. [7]



Obr. 15 Cyklický elektronový urychlovač Rhodotron [7]

4.2.2 Technologie ozařování gama zářením

Na rozdíl od beta záření, kde je proces ozařování dokončen v řádech několika sekund, u gama záření je potřeba na ozáření několik hodin. Gama záření vzniká rozpadem radioaktivního izotopu kobaltu ^{60}Co . Tento radioizotop vzniká ozářením stabilního izotopu kobaltu ^{59}Co energetickými neutrony (např. v jaderném reaktoru). Radioizotop ^{60}Co se rozpadá s poločasem rozpadu 5,27 let a přitom uvolňuje silné gama záření. Má výrazně větší hloubku průniku než je u beta záření. Díky tomu je možné některé výrobky ozařovat přímo na paletách a ušetřit tak manipulační čas. K odstínění záření se kobalt ponoří do nádoby s vodou do hloubky několika metrů, aby nedošlo k ozáření osob a újmě na zdraví. [7], [11]



Obr. 16 Sítování pomocí gama záření [16]

5 TVRDOST

Tvrlost je možné definovat jako odpor materiálu proti vnikání. Měří se v porovnání s ostatními zkouškami pevnosti velmi rychle a lze ji měřit i na hotových výrobcích. Při těchto zkouškách dochází k porušení povrchu, avšak jen v malém měřítku. Díky zjištěné tvrdosti lze přibližně vypočítat pevnost v tahu.

Zkoušky tvrdosti lze dělit na:

- **statické** (tvrlost podle Brinella, Rockwella, Vickerse, Knoop),
- **dynamické** (Poldiho kladívko, Baumanovo kladívko, Shoreho skleroskop, duroskop).

Zkoušky tvrdosti se provádí nejčastěji vtlačováním či vnikáním zkušební tělesa do povrchu měřeného materiálu. Jedná se tedy o zkoušky vnikací (indentační). Zkoušky tvrdosti lze však provádět i jiným způsobem jako například odrazem nebo vrypem. [13]

Statické zkoušky tvrdosti se dělí dle normy ČSN ISO 14577-1 podle velikosti zatěžující síly působící na indentor a hloubky vtisku:

1. zkoušky makrotvrlosti – $2 \text{ N} < F < 30\,000 \text{ N}$,
2. zkoušky mikrotvrlosti – $2 \text{ N} > F$, $h > 200 \text{ nm}$,
3. zkoušky nanotvrlosti – $0,1 > F$, $h < 200 \text{ nm}$.

Kde: F – maximální přitlačná síla indentoru

h – maximální hloubka vytvořeného vtisku [16]

5.1 Statické indentační zkoušky tvrdosti

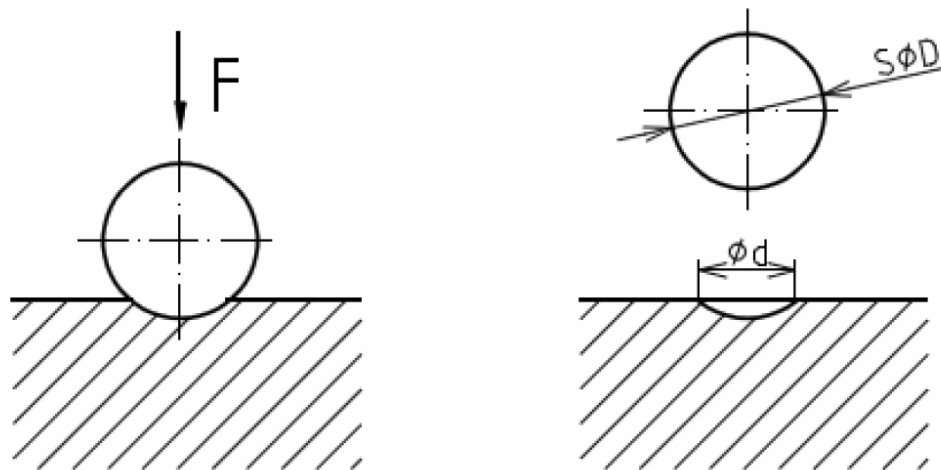
Tvrlost se u těchto testů určuje nejčastěji z velikosti a tvaru vtisku způsobeného indentorem. U většiny indentačních testů tvrdosti materiálů je výsledkem tvrdost materiálu. Avšak Vickersův, Berkovichův a Knoopův diamantový indentor se používá i k získání dalších mechanických vlastností pevných látek, jako například houževnatost, pevnost a vnitřní úroveň zbytkového napětí. [16]

5.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Podstatou této zkoušky je vtlačování kalené ocelové kuličky normalizovaného průměru (používají se průměry 10; 5; 2,5; 2 a 1 mm). Síla, kterou je kulička zatlačována je odvozena od průměru kuličky a tvrdosti zkoušeného materiálu (můžou být $F = 300D^2$, $F = 100D^2$, $F =$

$50D^2$ a $F = 25D^2$). Doba, po kterou je zkušební kulička vtlačována, je taktéž normalizovaná a může to být 10, 30, 120 nebo 180s. Pro měření tvrdosti měkkých materiálů se používá zakalená ocelová kulička (do 450 HB). Když se předpokládá vyšší tvrdost zkoušeného materiálu, je použita kulička ze slinutého karbidu (do 650 HB). [13, 14]

Zkušební stroje pro tuto zkoušku se nazývají Brinellovy tvrdoměry. Pro dílenské účely je možné použít přenosné tvrdoměry nazývané Poldiho kladívko. [13]



Obr. 17 Princip zkoušky podle Brinella [14]

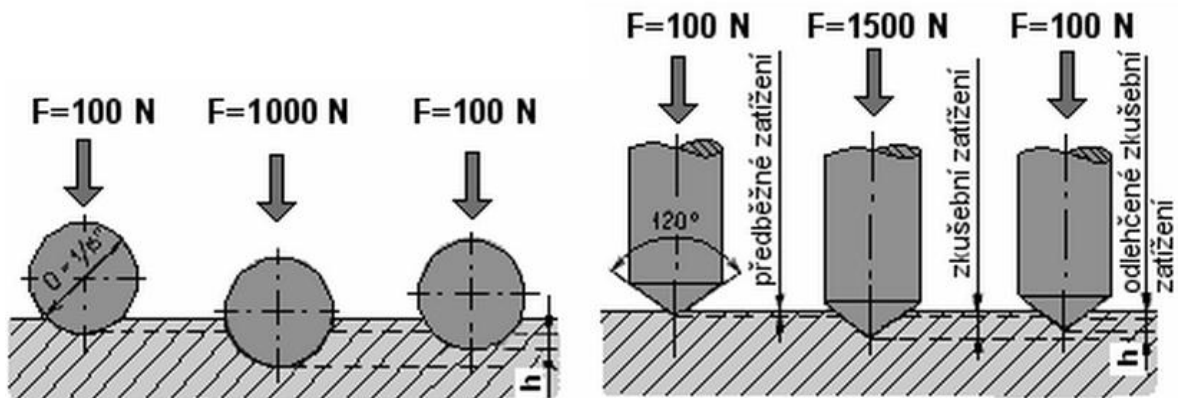
Kulička se do materiálu zatlačí a po odlehčení zůstane v materiálu kruhový otisk, u kterého se změří průměr. Poté se tvrdost odečte z tabulek podle toho, jaký je průměr vtisku, jaká byla použita síla, jaký byl průměr a materiál samotné kuličky.

Nevýhodou této zkoušky je, že ne vždy úplně zřetelný okraj vtisku, dále pak metoda jeho změření může být nepřesná a také deformace kuličky může způsobit nepřesnost. [13]

5.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Tato zkouška se liší od Brinellovy tím, že se neměří průměr vtisku, ale hloubka vtisku zkušebních tělísek. Jsou zde normalizovány tři způsoby jak je možné tvrdost změřit:

1. Zkouška s označením **HRA** – do zkušebního tělíska je vtlačován diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120° a nejvyšším zatížení 600 N.
2. Zkouška s označením **HRC** – do zkušebního tělíska je vtlačován diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120° o nejvyšším zatížení 1500 N.
3. Zkouška s označením **HRB** – do zkušebního tělíska je vtlačována kalená kulička o průměru $1/16''$ o nejvyšším zatížení 1000 N [13]



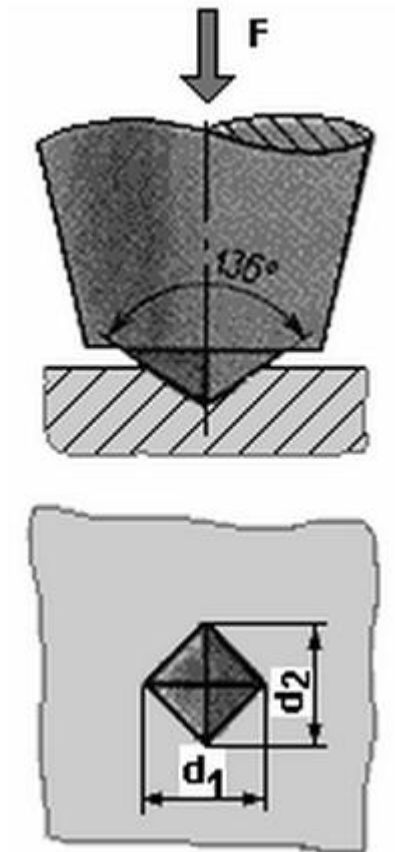
Obr. 18 Příklad zkoušky tvrdosti podle Rockwella (HRB, HRC) [15]

Zkoušky tvrdosti podle Rockwella se provádí na přístrojích zvaných Rockwellův tvrdoměr. Ocelova kulička nebo diamantový kužel se nejprve předzatíží silou o velikosti 100 N, aby se odstranila nepřesnost kvůli povrchovým mikronerovnostem. Poté se postupně zatěžující síla zvyšuje až na maximum. Po dosažení maxima ještě síla musí působit po dobu alespoň 6 sekund. Hloubka vtisku se odečítá z úchylkoměru na přístroji. Po ustálení ručičky úchylkoměru se zatížení postupně snižuje až na hodnotu předzátěže (tj. 100 N). Díky tomu se odstraní pružná deformace a odečte se rozdíl, který vznikl mezi stavem v předzatížení. [13]

5.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Podstatou měření podle Vickersovy metody je vtlačování čtyřbokého diamantového jehlanu, jehož vrcholový úhel protilehlých stran je 136° . Vtlačování probíhá určitou silou a rychlostí do měřeného materiálu. Zatěžující síla bývá od 10 N do 1000 N. Doba zátěže je v rozmezí 10 – 180 sekund. Zkoušky podle Vickerse s na přístrojích zvaných Vickersův tvrdoměr. [13]

Průběh zkoušky je následující. Přístroj má otočnou hlavu, ve které je upevněn diamantový hrot a zároveň objektiv. Do materiálu položeného na stůl tvrdoměru je vtlačen stiskem páky přes pružinu diamantový hrot a držen předepsanou dobu. Vytvoří tak čtvercový vtisk. Po odlehčení páky se otočí hlavou do druhé krajní polohy tak, aby byl objektiv nad vtiskem, a objektiv se přitlačí na materiál. Pomocí okuláru se stupnicí jsou změřeny délky obou úhlopříček d_1 a d_2 . Z obou délek se vypočte jejich aritmetický průměr a z tabulek odečte tvrdost. [13]



Obr. 19 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [14]

Tvrdotost podle Vickerse se vyjadřuje bezrozměrně a je určena poměrem vlačovací síly F a povrchu vtisku.

$$HV = 0,189 \cdot (F / d) \quad (6)$$

kde: F - síla vlačování

d – aritmetický průměr úhlopříček vtisku.

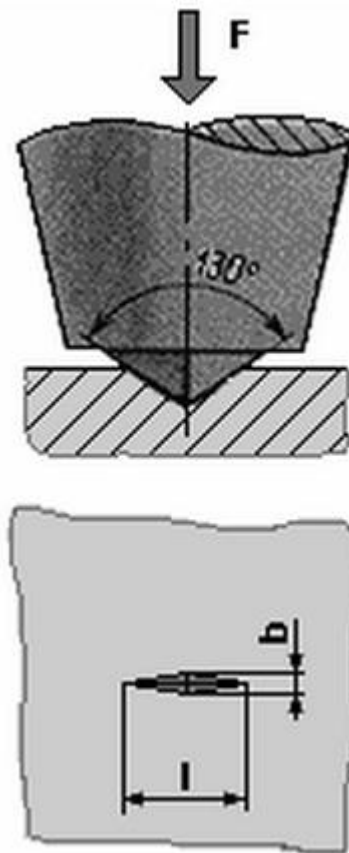
Pro praktickou potřebu se používají tabulky, kde je podle délky úhlopříčky d a použité síly F uvedena odpovídající tvrdost.

Metodu měření tvrdosti podle Vickerse lze použít pro všechny tvrdosti. Metoda je velmi přesná a je minimálně závislá na zatížení. [14]

5.1.4 Zkouška tvrdosti podle Knoop

Do povrchu materiálu se vlačuje pod zatížením silou F (působí kolmo na povrch vzorku) čtyřboký diamantový jehlan (poměr úhlopříček 7:1, úhly 130° a $172,5^\circ$). Metoda

podle Knoop patří mezi metody měření mikrotvrdosti. Metoda je vhodná pro tenké plastové desky, tenké kovové desky, křehké materiály nebo pro materiály, u kterých nesmí být použita síla větší než 3,6 kp. Zátěžová síla u metody podle Knoop pohybuje mezi 25 - 3600 p. Otisky u metody podle Knoop jsou při stejném zatížení téměř trojnásobně delší a mělkší, než u zkoušky podle Vickerse. Mělkost otisku může způsobit problémy při odčítání velikosti otisku. Při měření tvrdosti podle Knoop jsou kladeny vysoké nároky na úpravu povrchu zkoušeného materiálu a na ostrost hran vnikacího tělesa. [14]



Obr. 20 Zkouška tvrdosti podle Knoop [14]

Tvrdost podle Knoop se vyjadřuje bezrozměrně. Značí se HK a vzorec pro jeho vypočet je:

$$HK = (1,4509 \cdot F) / l_2 \quad (7)$$

kde: F - zatížení (působící síla) [N],
l₂ - délka delší úhlopříčky vtisku [mm]

5.2 Zkoušky mikrotvrdomosti

Měření mikrotvrdomosti je realizováno vtláčováním diamantového indentoru tvaru Vickersova nebo Knoopova jehlanu do povrchu měřeného materiálu silami v rozsahu od 1 g (0,09807 N) do 1000 g (9,807 N). Na rozdíl od běžné zkoušky tvrdosti podle Vickerse, kde jsou měření prováděny při zatíženích mezi 10 N a 1200 N. První použití těchto zkoušek se datuje do roku 1932 a použil je ústav National Physical Laboratory ve Velké Británii.

S klesajícími aplikovanými silami (zmenšující se velikosti vtisku) při měření tvrdosti přesnost měření klesá. Dále s klesající zatěžujícími silami do oblasti mikrotvrdomosti již není Vickersova tvrdost (na rozdíl od makrotvrdomosti) nezávislá na velikosti aplikovaného zatížení.

Jelikož jsou vtisky při zkoušení mikrotvrdomosti malé, je použití této metody vhodné pro:

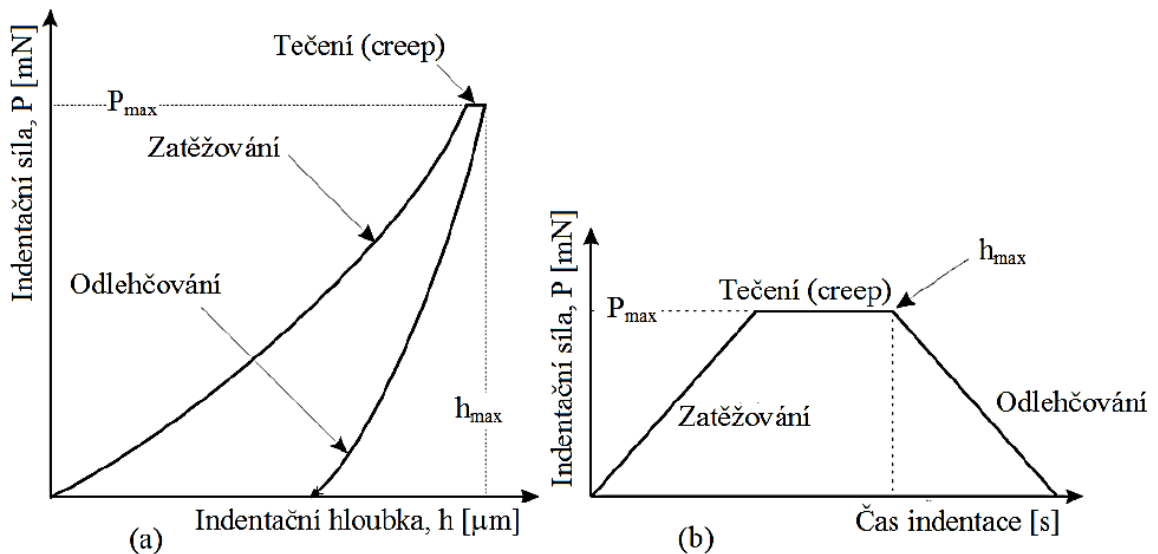
- měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušebního vzorku,
- malé nebo tenké součásti,
- měření mikrotvrdomosti strukturních složek a fází,
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování,
- hodnocení svarových spojů,
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků,
- studium difúzních pochodů,
- měření křehkých materiálů,
- atd. [19]

5.3 Instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI)

U klasického měření tvrdosti se používá tzv. zobrazovací metoda založená na zjišťování rozměrů reziduálního vtisku. Tato metoda se postupem s rozvojem technologie tenkých vrstev a požadavků na měření lokálních mechanických vlastností stala nedostatečnou. Hlavní nevýhody těchto zastaralých metod spočívají zejména v nemožnosti měřit mechanické vlastnosti velmi tenkých vrstev nebo velmi elastických vrstev. To dalo podnět ke vzniku nové indentační techniky nazývané DSI (Depth Sensing Indentation). Vznik této metody se datuje do sedmdesátých let dvacátého století, jejíž autoři jsou Bulichev a Alekin. Tuto metodu pak dále zdokonalili z hlediska metodologie, analýzy a shromáždění dat Oliver a Pharr.

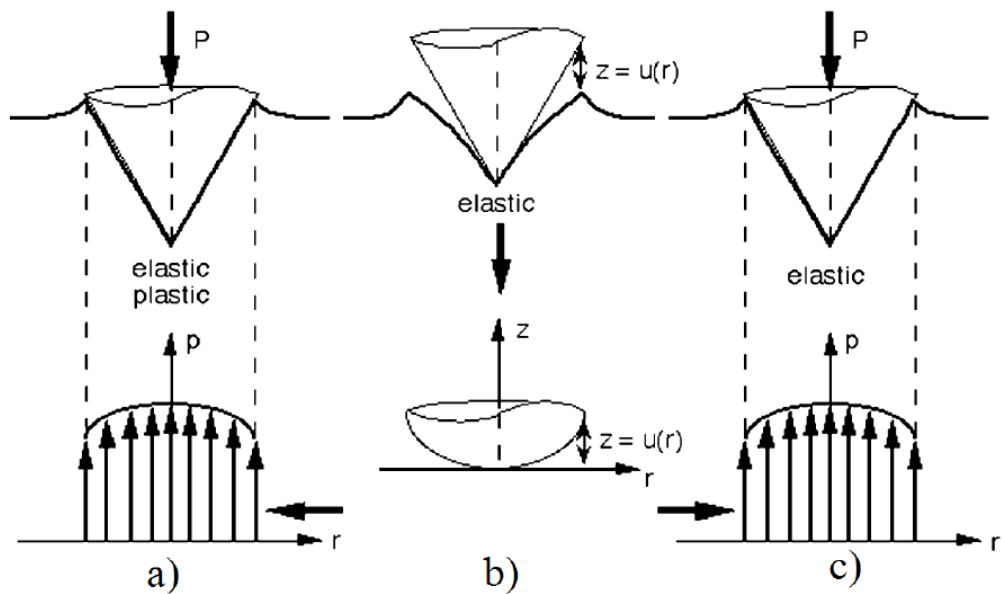
Principem této metody je současná detekce okamžité změny hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu a nárůstu (či poklesu) zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Při grafickém zpracování dat vznikne charakteristická indentační

křivka závislosti zatížení a hloubky vtisku (obr. 21). První fází klasického indentačního cyklu je řízené zatěžování, během kterého je indentor zatěžován definovanou rychlostí. V druhé fázi cyklu dochází k postupnému snižování zatěžující síly, tedy k odlehčování až na nulovou hodnotu. Mezi zatěžování a odlehčování se často vkládá prodleva, během které je zkušební těleso vystaveno maximální zatěžující síle, což umožňuje zkoumat tečení (creep). [16]



Obr. 21 Indentační křivka (a), časový diagram indentační zkoušky (b) [16]

Při zatěžování touto metodou dochází k elasticko-plastické deformaci a tvar vtisku odpovídá negativu tvaru indentoru (obr. 22 a). Avšak během odlehčování dochází k elastickému zotavení a dochází ke změně tvaru vtisku, kdy tvar vtisku neodpovídá tvaru indentoru (obr. 22 b). Po opětovném zatížení se kontaktní plocha postupně zvyšuje až do plného zatížení. Během opětovného zatížení a odlehčení dochází u obou procesů k elastické deformaci (obr. 22 c). [16]



Obr. 22 Průběh zatěžování a odlehčování indentoru [16]

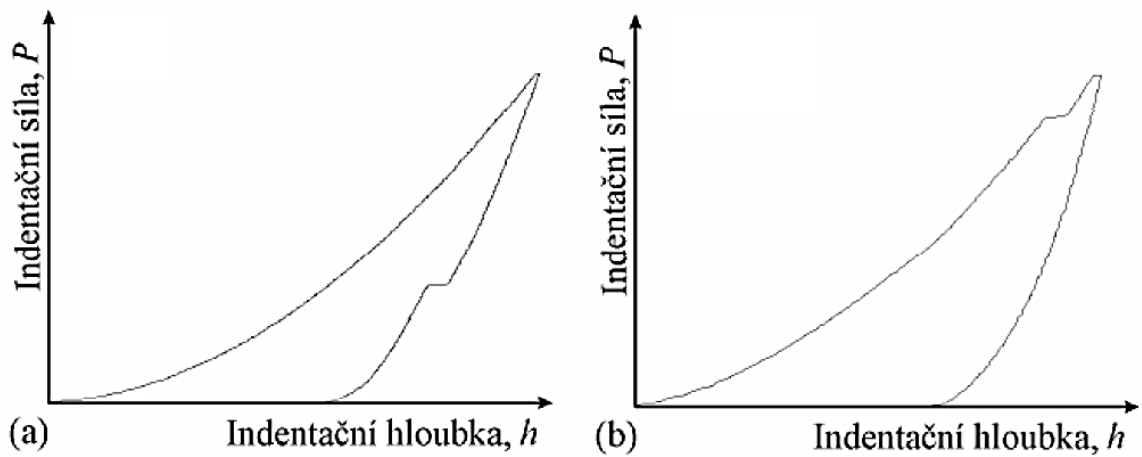
a) zatížení, b) odlehčení, c) opětovné zatížení

Pomocí této zkoušky lze vyhodnotit jak elastický modul, tak tečení materiálu (creep), lomovou houževnatost, práci vynaloženou na vtisk a fázové transformace. [16]

5.3.1 Indetanční křivky

Jak již bylo zmíněno, podstatou instrumentované zkoušky tvrdosti, je kontinuální záznam zatěžující síly a okamžité polohy indentoru. Grafické vyjádření této závislosti je označováno jako indetanční křivka. [16]

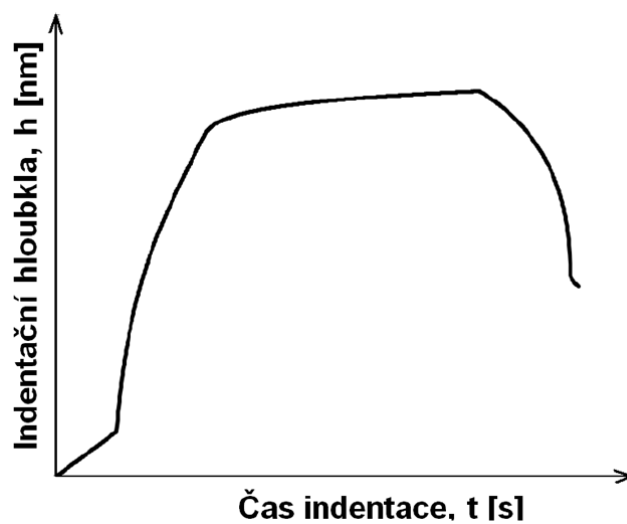
Nejvíce ovlivňuje tvar indetanční křivky odezva měřeného materiálu na indentaci. Tvar těchto indetančních křivek neslouží pouze k výpočtu tvrdosti a modulu pružnosti, ale je zdrojem dalších důležitých informací, např. trhliny a delaminace vrstvy. Fázová transformace se na indetanční křivce projevuje nespojitým průběhem (obr. 23). [16]



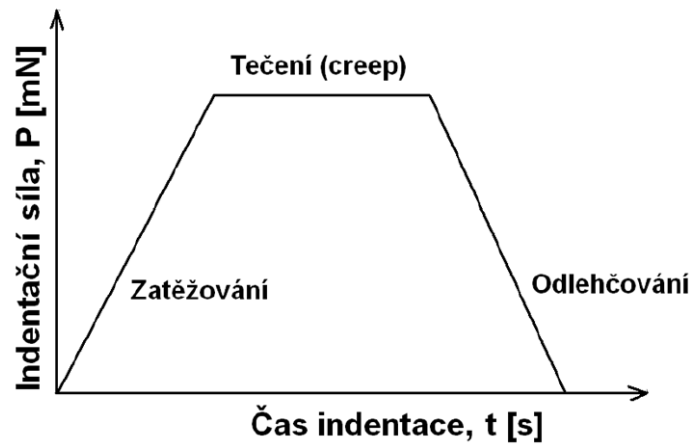
Obr. 23 Nespojité průběh indentačních křivek [16]

(a) fázová transformace, (b) praskání při transformaci

Jako doplňkovou informaci, která vypovídá o odezvě materiálu na plynulé zatěžování či odlehčování, lze vyjádřit jako grafickou závislost zatížení na čase nebo závislost hloubky průniku na čase (obr. 24).



Obr. 24 Závislost indentační hloubky na čase [16]

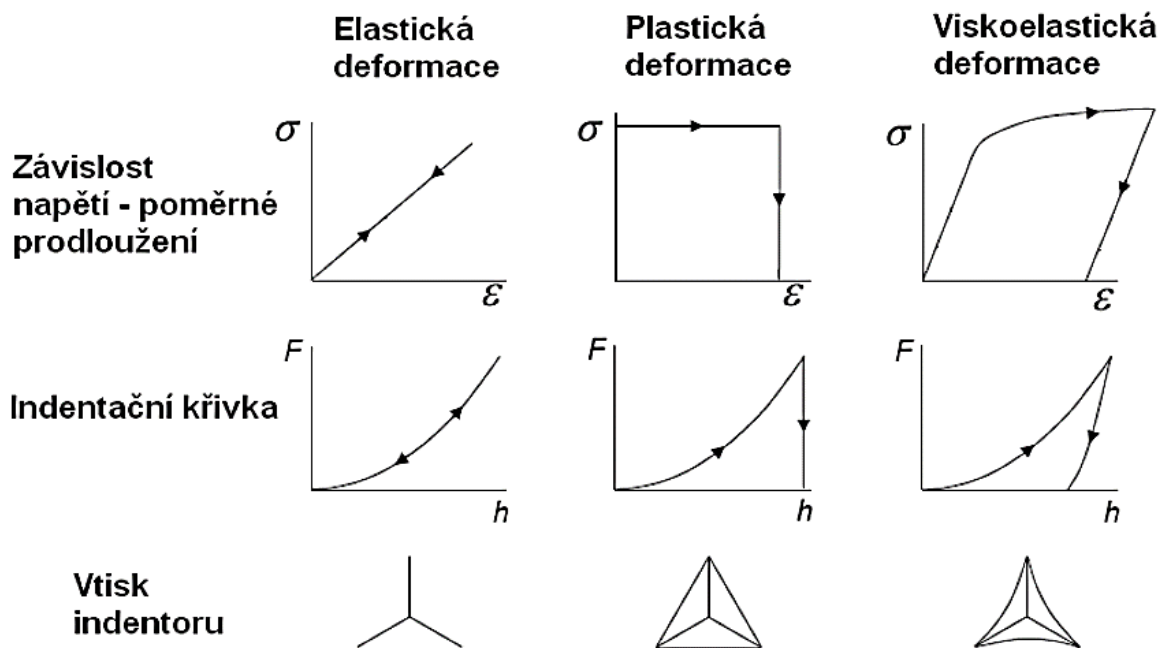


Obr. 25 Závislost velikosti síly na čase [16]

Na začátku zatěžování indentoru jsou deformace pouze elastické a až do meze kluzu. S dalším zatěžováním se začnou výrazně projevovat plastické deformace. Není-li překročena mez kluzu u elastického materiálu a dojde k odlehčení, jsou křivky odtěžovací a zatěžovací totožné. Plastická deformace je v tomto případě nulová. [16]

Podle toho jak materiály reagují na vnější silové působení, lze je rozdělit do tří skupin (Obr. 26):

- elastické,
- plastické,
- plasticko-elastické (viskoelastické). [16]



Obr. 26 Charakteristické tvary indentačních křivek pro různé materiály [16]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo porovnání mechanických vlastností ozářeného PC (Polykarbonát) s neozářeným instrumentovanou zkouškou mikrotvrdomosti (DSI). Zkušební tělesa PC byla připravena dle příslušné normy technologií vstřikování a následně ozářena dávkami beta záření 33, 66, 99, 132, 165, 198 kGy. Výsledné mechanické vlastnosti byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cíle řešení diplomové práce:

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

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro tento experiment byl zvolen materiál PC Makrolon 2205. Zkušební tělesa byly ozařovány dávkami 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy a následně porovnávány jak mezi sebou tak s neozářenými zkušebními tělesy.

PC ve formě granulí byl nejprve zpracován na vstřikovacím stroji Arburg a následně vystaven uvedeným dávkám záření. Po ozáření byla u zkušebních těles zjišťována tvrdost za pomoci zařízení MICRO-COMBI TESTER (Vickersův tvrdoměr). Nakonec byly výsledky graficky zpracovány.

7.1 Vlastnosti použitého materiálu

Polykarbonát Makrolon 2205 je neplněný amorfní termoplast, může být transparentní v různých stupních. Je vhodný pro výrobu vstřikováním díky svým reologickým vlastnostem (snadno tekoucí). Tento polymer je na bázi bisfenolu A, s nízkou molekulovou hmotností. Oproti ostatním polykarbonátům se vyznačuje nižší houževnatostí.

Tab. 2 Materiálové vlastnosti PC

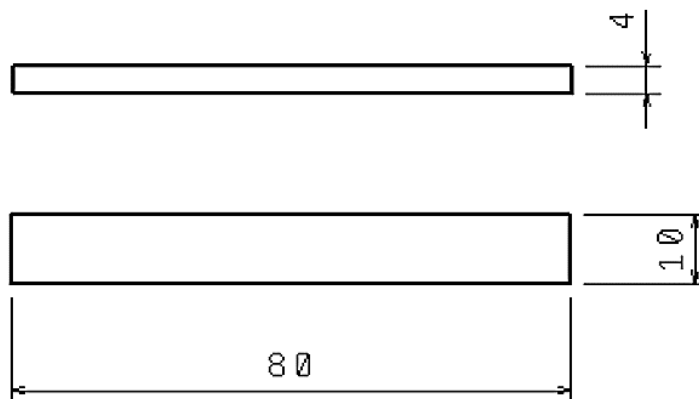
Název	Makrolon 2207
Výrobce	Bayer Material Science
Material ID	14603
Struktura	Amorfní
Younguv modul [MPa]	2400
Smykový modul [MPa]	869
Poissonova konstanta	0,38

7.2 Výroba zkušebních těles

Zkušební tělesa byla vyráběna vstřikováním na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 420C. Tvar vzorků byl vyroben v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1. Parametry vstřikování byly zvoleny dle doporučení výrobce materiálu.



Obr. 27 ARBURG ALLROUNDER 420C



Obr. 28 Rozměry zkušebního tělesa

7.2.1 Parametry vstřikování

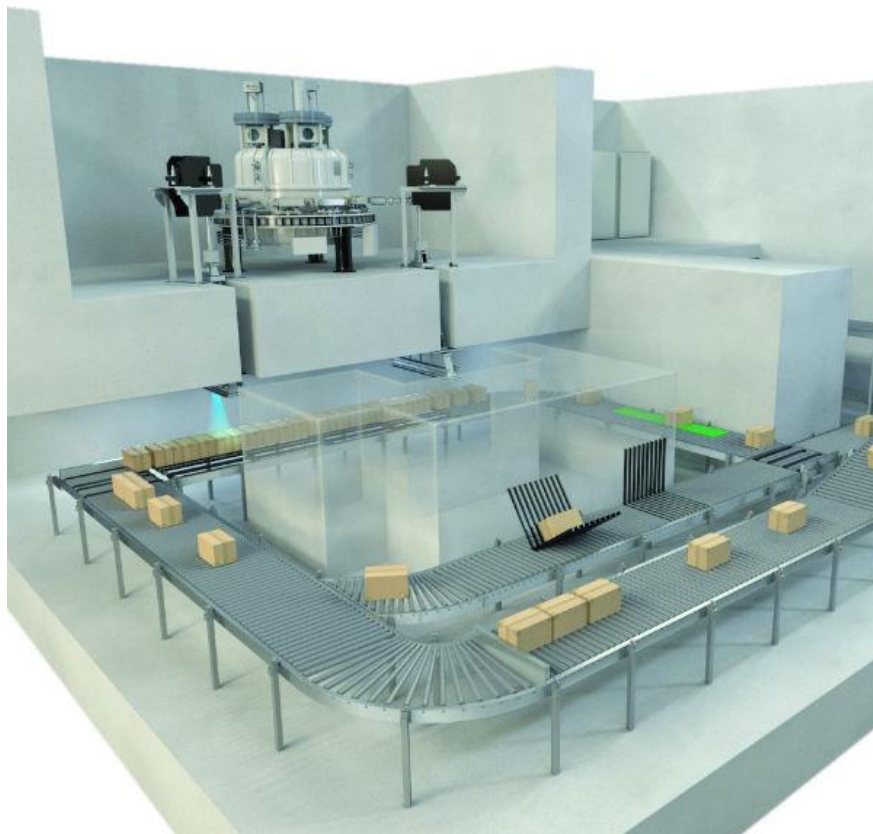
Při vstřikování zkušebních těles byly procesní parametry na vstřikovacím stroji nastaveny dle doporučení výrobce materiálu.

Tab. 3 Procesní parametry při vstřikování

Parametr [Jednotky]	Hodnota
Vstřikovací tlak [Bar]	600
Rychlost vstřikování [mm/s]	50
Dotlak [MPa]	400
Celkový čas dotlaku [s]	10
Doba chlazení [s]	30
Teplota formy [°C]	90
Teplota pod násypkou [°C]	40
Teplotní pásmo 1 [°C]	260
Teplotní pásmo 2 [°C]	270
Teplotní pásmo 3 [°C]	275
Teplotní pásmo 4 [°C]	280
Teplota trysky [°C]	280

7.3 Ozařování zkušebních těles

Ozařování zkušebních těles probíhalo v německé firmě Beta-Gamma Service. Ozařování probíhalo bez ochranné atmosféry za pokojové teploty. Jako zdroj záření byl použit elektronový urychlovač Rhodotron – 10 MeV. Rozsah dávek záření byl z praktického hlediska zvolen od 33 kGy do 198 kGy. Každý průjezd scannerem urychlovače ozářil zkušební tělesa dávkou o velikosti 33 kGy. Tudíž vzorky o nejvyšší dávce projely celkem 6x, aby bylo dosaženo daných 198 kGy.



Obr. 29 Linka na ozařování

7.4 Leštění zkušebních těles

Pomocí této úpravy selepší a zpřesní proces měření mikrotvrdosti. Samotné leštění bylo provedeno na leštičce BUEHLER EcoMet 250 PRO (Obr. 30). Zkušební tělesa byla leštěna v několika krocích, aby bylo dosaženo co nejlepšího efektu. Nejprve se povrch leštil pomocí brousících kotoučů s různými zrnitostmi a nakonec se doleštil pomocí textilního plátka a diamantové suspenze s velikostí brousících zrn $3\ \mu\text{m}$.

Parametry leštění:

- přitlačná síla – 25 N,
- otáčky vzorků – $30\ \text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$,
- otáčky plátka – $300\ \text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 30 Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO

8 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI

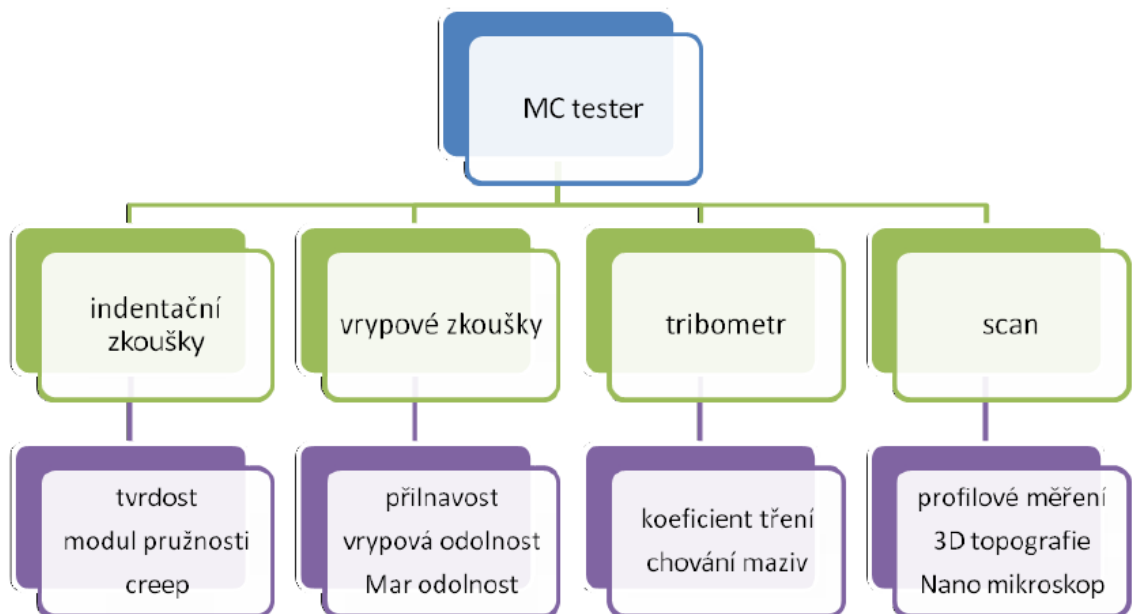
Měření mikrotvrdomosti zkušebních těles bylo prováděno na přístroji Micro Combi Tester v souladu s normou ČSN EN ISO 14577-1.

Parametry zkoušky:

- aplikované zatížení – 0,5 N; 1 N; 5 N;
- zatěžující a odlehčující rychlost – $1 \text{ N}\cdot\text{min}^{-1}$ (pro 0,5 N), $2 \text{ N}\cdot\text{min}^{-1}$ (pro 1 N) a $10 \text{ N}\cdot\text{min}^{-1}$ (pro 5 N),
- doba setrvání na maximálním zatížení – 90 s,
- Poissonovo číslo – 0,3.

8.1 Tvrdoměr Micro-Combi Tester

Tento tvrdoměr od firmy CSM Instruments disponuje velkou řadou způsobů měření s pomocí přídatných modulů (Obr. 31)



Obr. 31 Moduly pro Micro-Combi Tester



Obr. 32 Tvrdoměr Micro-Combi Tester

(1 – měřicí hlava, 2 – univerzální držák, 5 – posuv, 6 – optický mikroskop, 7 – modulová hlava, 8 – anti-vibrační stojan, 9 – optický senzor, 10 – kryt stolu)

9 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Vyhodnocení výsledků získaných metodou instrumentované vnikací zkoušky pro stanovení tvrdosti a dalších materiálových parametrů proběhla v souladu s normou ISO 14577.

9.1 Měřené materiálové parametry

1. Vtisková tvrdost	H_{IT} [MPa]
2. Vtiskový modul pružnosti	E_{IT} [GPa]
3. Vtiskové tečení (Creep)	C_{IT} [%]
4. Elastická deformační práce	W_e [pJ]
5. Plastická deformační práce	W_p [pJ]
6. Koeficient zpětné deformace	n_{it} [%]

9.2 Statistické vztahy

1. Aritmetický průměr

Je nejpoužívanější a nejznámější statistická veličina, který vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot. Aritmetický průměr se obvykle značí vodorovným pruhem nad názvem proměnné. Jeho definice je součet všech hodnot souboru vydělený jejich počtem.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

kde: \bar{x} – aritmetický průměr

n – počet měření

x – i -tá hodnota měřené veličiny

2. Směrodatná odchylka

Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru. Jednoduše řečeno vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší typické případy v souboru zkoumaných čísel. Pokud je malá, jsou si hodnoty v souboru navzájem podobné.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

kde: s – směrodatná odchylka

\bar{x} – aritmetický průměr

n – počet měření

x_i – i -tá hodnota měřené veličiny

9.3 Vtisková tvrdost H_{IT}

Je definována jako míra odolnosti vůči trvalé deformaci nebo poškození tj. míra maximálního zatížení podělená průmětem stykové plochy. [21]

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \quad (10)$$

kde: F_{max} – maximální síla

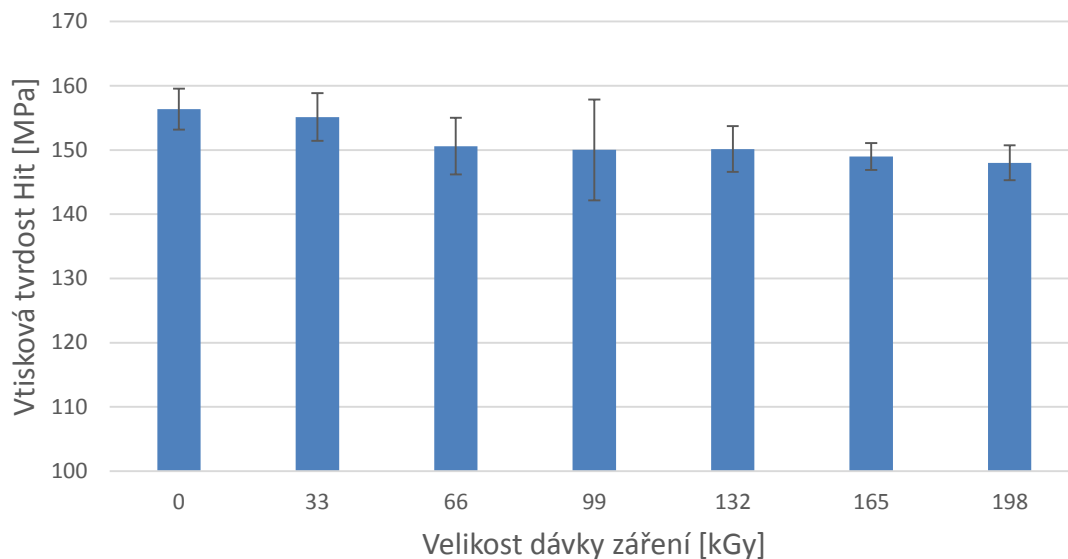
A_p – průmět kontaktní plochy

H_{IT} – vtisková tvrdost [21]

9.3.1 Grafické znázornění hodnot vtiskových tvrdostí

Naměřené hodnoty jsou seřazeny dle velikosti dávky záření a navzájem porovnány. U každé dávky bylo 10 měření, ze kterých byl vypočten průměr a směrodatná odchylka. Porovnávané hodnoty jsou rozděleny do jednotlivých grafů dle velikosti zatížení indentoru.

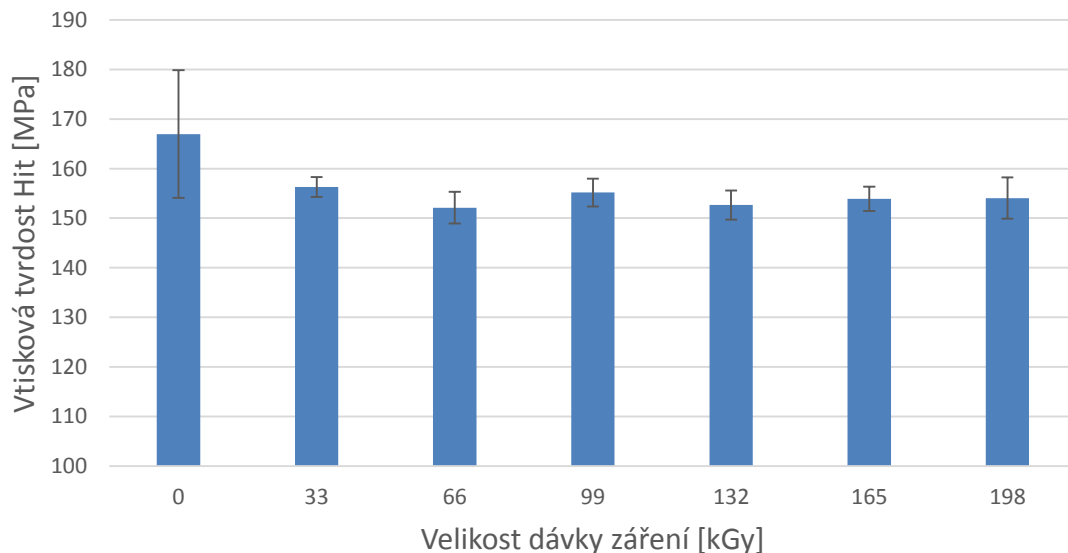
1. Zatížení indentoru 0,5 N



Obr. 33 Vtisková tvrdost při zatížení 0,5 N

Při zkoušce mikrotvrdomosti byla naměřena nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti 148 MPa u nejvyšší ozářené dávky 198 kGy. Naopak nejvyšší tvrdost 156 MPa byla naměřena u neo-
zářených zkušebních těles (Obr. 33).

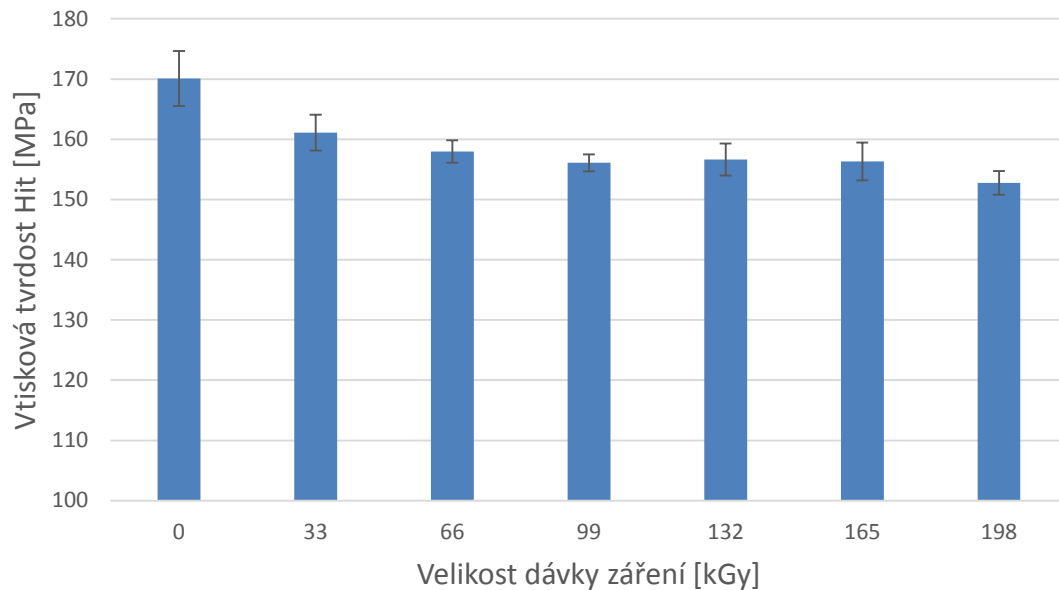
2. Zatížení indentoru 1 N



Obr. 34 Vtisková tvrdost při zatížení 1 N

Při zkoušce mikrotvrdomosti zatížením indentoru 1 N byla naměřená nejmenší vtisková tvrdost 152 MPa u dávky záření 66 kGy. Naopak nejvyšší 167 MPa byla opět naměřena u neo-
ozářených zkušebních těles jak je patrné z obrázku 34.

3. Zatížení indentoru 5 N



Obr. 35 Vtisková tvrdost při zatížení 5 N

U nejvyššího zatížení indentoru 5 N byla nejnižší hodnota vtiskové tvrdosti 153 MPa naměřena u zkušebních těles ozářených dávkou 198 kGy a naopak nejvyšší 170 MPa u neozářených (Obr. 35).

9.4 Vtiskový modul E_{IT}

Vtiskový modul je vyjádřen jako směrnice tečny odtěžující křivky. Hodnoty modulu následně odpovídají Youngověmu modulu. Avšak mohou nastat dva případy nepřesnosti, a to „pile up“ a „skin-in“. První případ nastává, když se při penetraci zkušebního tělesa pod hrotem nashromáždí materiál. Skin-in je opak, tedy že vznikne propadlina. [21]

Výpočet vtiskového modulu:

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (11)$$

kde: E^* - komplexní modul pružnosti

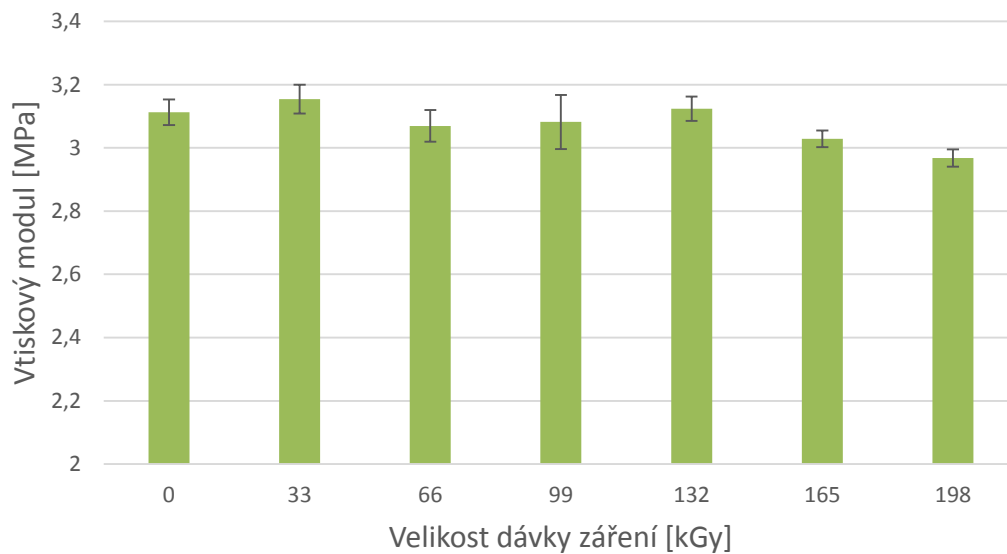
ν_s – Poissonova konstanta

E_{IT} – vtiskový modul [21]

9.4.1 Grafické znázornění hodnot vtiskových modulů

Naměřené hodnoty byly opět seřazeny dle velikosti dávky záření a navzájem porovnány. U každé dávky bylo provedeno 10 měření, ze kterých byl vypočten průměr a směrodatná odchylka. Porovnávané hodnoty jsou rozděleny do jednotlivých grafů dle velikosti zatížení indentoru.

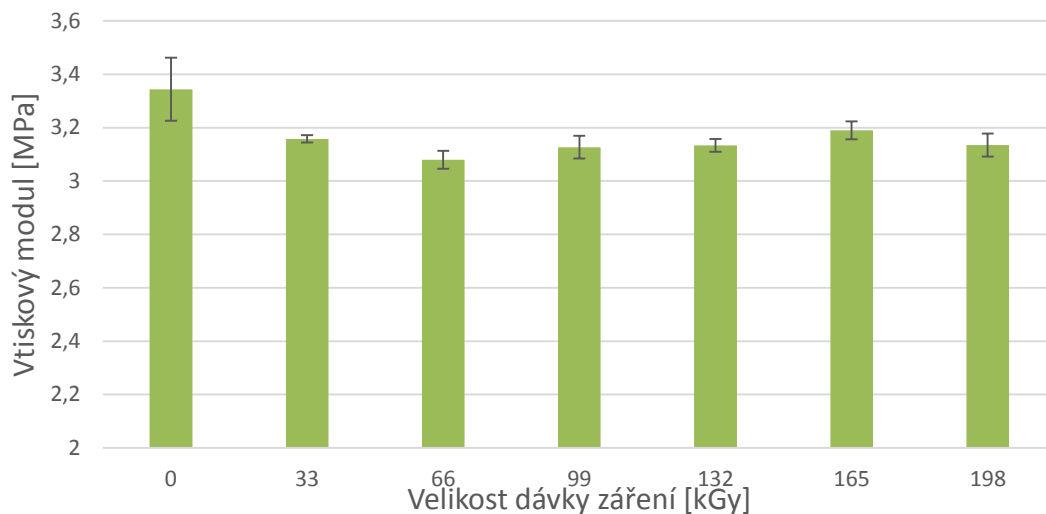
1. Zatížení indentoru 0,5 N



Obr. 36 Vtiskový modul při zatížení 0,5 N

Při zkoušce mikrotvrdomosti byla naměřena nejvyšší hodnota vtiskového modulu 3,15 MPa u ozářených zkušebních těles dávkou o velikosti 33kGy. Nejnižší hodnoty vtiskového modulu 2,97 MPa byly naměřeny u zkušebních těles, které byly ozářeny dávkou 198kGy (Obr. 36).

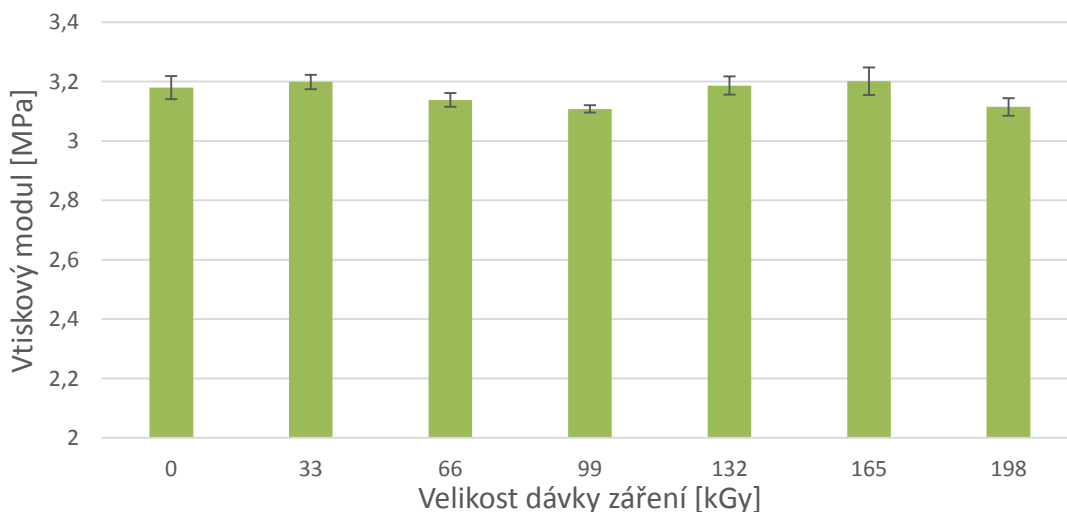
2. Zatížení indentoru 1 N



Obr. 37 Vtiskový modul při zatížení 1 N

Při zatížení indentoru 1 N byl naměřen nejvyšší vtiskový modul 3,34 MPa u neozářených zkušebních těles. Naopak nejnižší hodnoty modulu 3,08 MPa byly naměřeny u zkušebních těles ozářených dávkou 66 kGy (Obr. 37).

3. Zatížení indentoru 5 N



Obr. 38 Vtiskový modul při zatížení 5 N

Při měření mikrotvrdomosti nejvyšším zatížením 5 N byl naměřen největší vtiskový modul 3,2 MPa u vzorků ozářených dávkou 165 kGy a naopak nejmenší byl naměřen u dávky 99 kGy a to 3,1 MPa. Je však nutné podotknout, že hodnoty byly značně kolísavé s nepatrnými rozdíly (Obr. 38)

9.5 Vtiskové tečení (Creep)

Je definováno jako relativní změna hloubky vtisku a je označeno C_{IT} . [21]

Výpočet Creepu:

$$C_{IT} = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \cdot 100 \quad (12)$$

kde: h_1 – hloubka vtisku dosažená zkušební silou (je udržována konstantně)

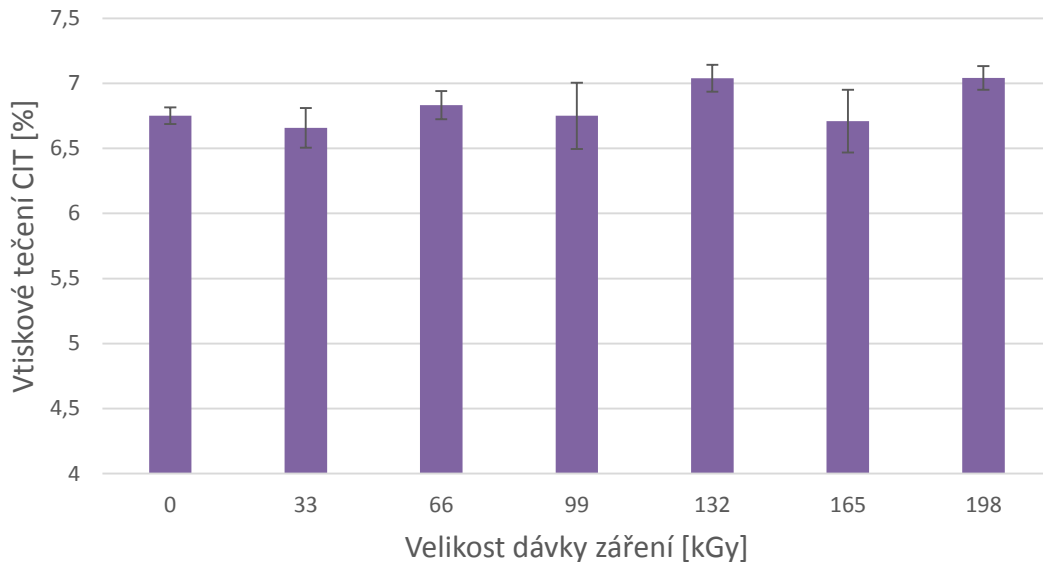
h_2 – hloubka vtisku během zkoušky konstantní silou

C_{IT} – Creep [21]

9.5.1 Grafické znázornění hodnot vtiskového tečení (Creep)

Naměřené hodnoty jsou seřazeny dle velikosti dávky záření a navzájem porovnány. U každé dávky bylo 10 měření, ze kterých byl vypočten průměr a směrodatná odchylka. Porovnávané hodnoty jsou rozděleny do jednotlivých grafů dle velikosti zatížení indentoru.

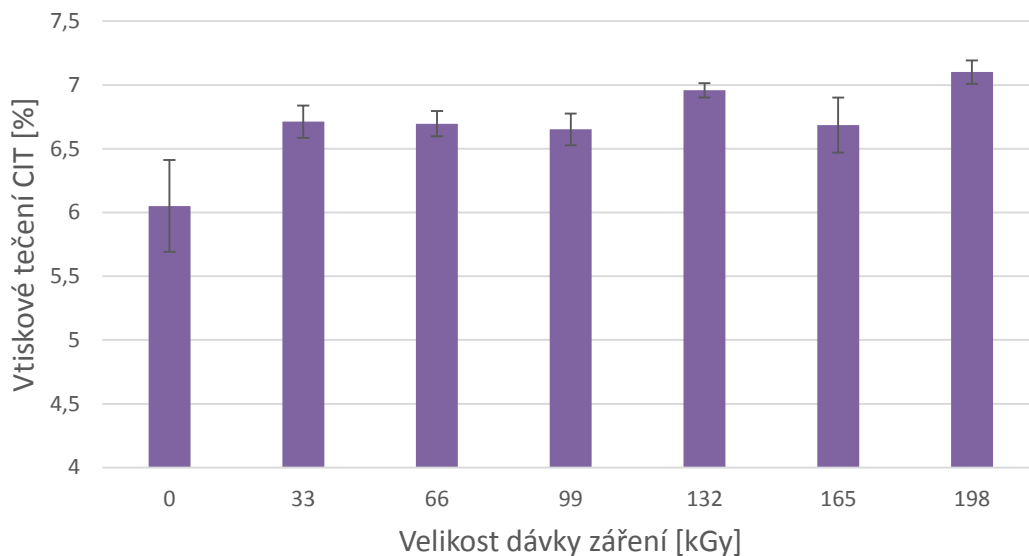
1. Zatížení indentoru 0,5 N



Obr. 39 Vtiskové tečení při zatížení 0,5 N

Z obrázku 39 je patrné, že při zkoušce mikrotvrlosti byly naměřeny nejvyšší hodnoty vtiskového tečení a to 7,04% u zkušebních těles ozářené dávkou 198kGy a naopak nejnižší byly naměřeny o velikosti 6,65% u dávky záření 33kGy.

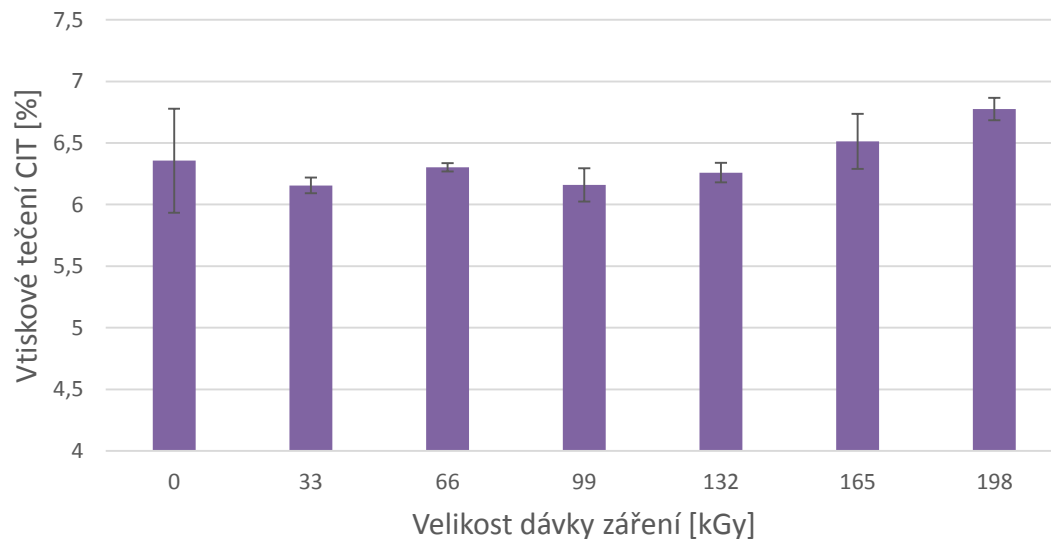
2. Zatížení indentoru 1 N



Obr. 40 Vtiskové tečení při zatížení 1 N

Při vyšším zatížení indentoru 1 N byla nejvyšší hodnota 7,10% opět naměřena u zkušebních těles ozářených dávkou 198kGy a nejmenší hodnota 6,05% byla naměřena u neozářených zkušebních těles (Obr. 40).

3. Zatížení indentoru 5 N



Obr. 41 Vtiskové tečení při zatížení 5 N

Zkouškou mikrotvrdomosti zatížením indentoru 5 N byla naměřena nejvyšší hodnota vtiskového tečení 6,77% u dávky 198 kGy. Naopak nejmenší hodnoty 6,15% vykazovaly zkušební tělesa ozářené dávkou 33 kGy a 99 kGy (Obr. 41).

9.6 Deformační práce

Velmi důležitý parametr u mikrotvrlosti je deformační práce. Deformační práce je složená ze dvou částí. První obsahuje elastickou deformační práci, která je reakcí materiálu na zatížení s vratnou deformací. Druhá část je plastická deformační práce. Je definována jako odolnost proti vzniku plastické deformace. [21]

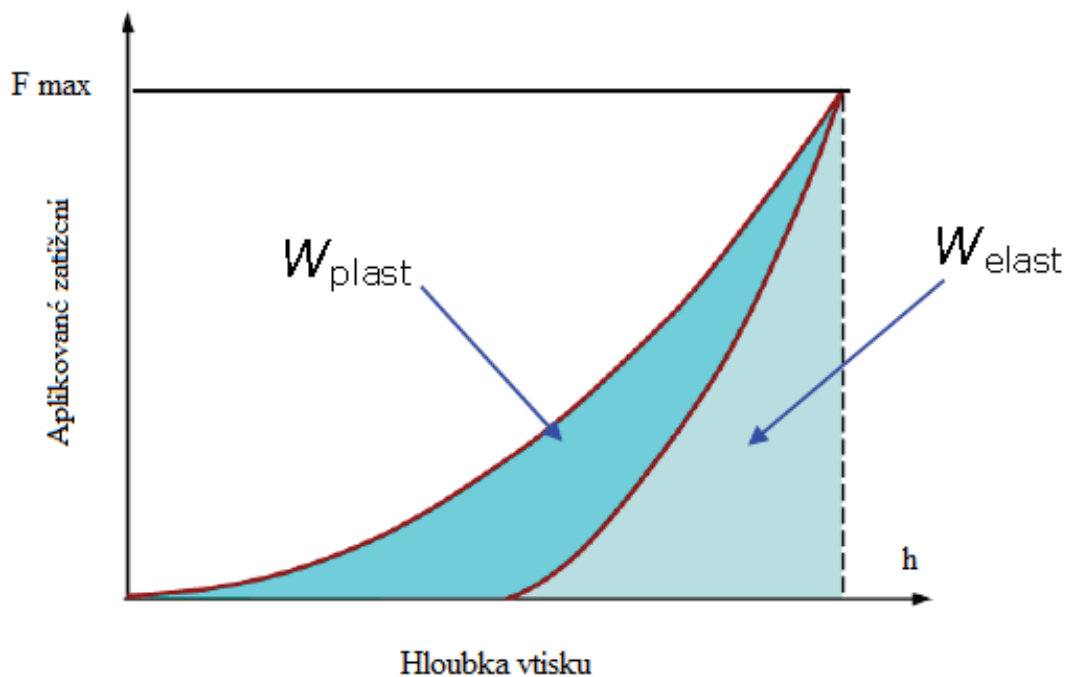
Deformační práci lze definovat rovnicí:

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \quad (13)$$

kde: W_{plast} – práce celková

W_{plast} – práce plastická

W_{elast} – práce elastická [21]

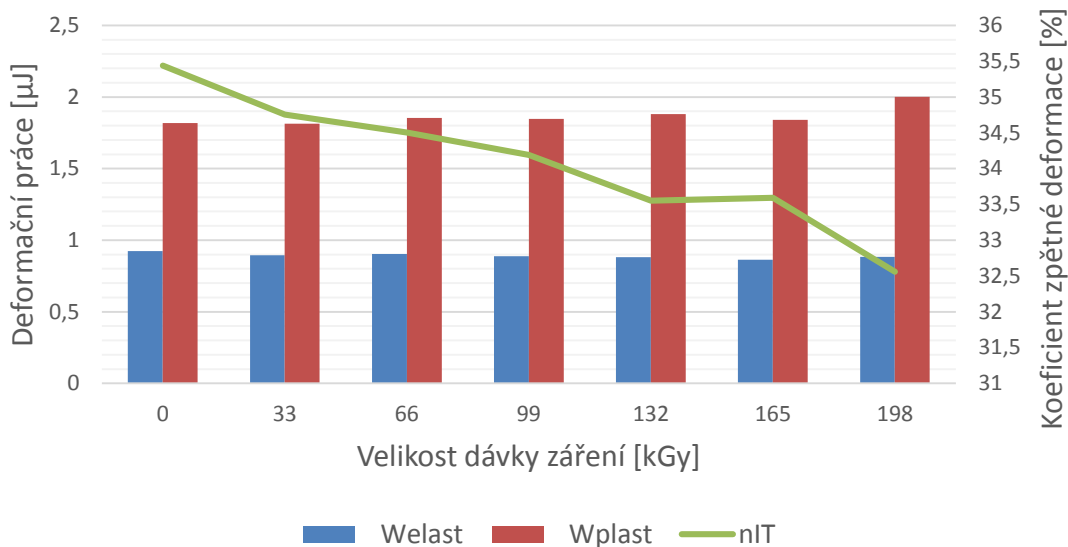


Obr. 42 Deformační práce [21]

9.6.1 Grafické znázornění hodnot deformace

Naměřené hodnoty jsou seřazeny dle velikosti dávky záření a navzájem porovnány. U každé dávky bylo 10 měření, ze kterých byl vypočten pouze průměr. Porovnávané hodnoty jsou rozděleny do jednotlivých grafů dle velikosti zatížení indentoru.

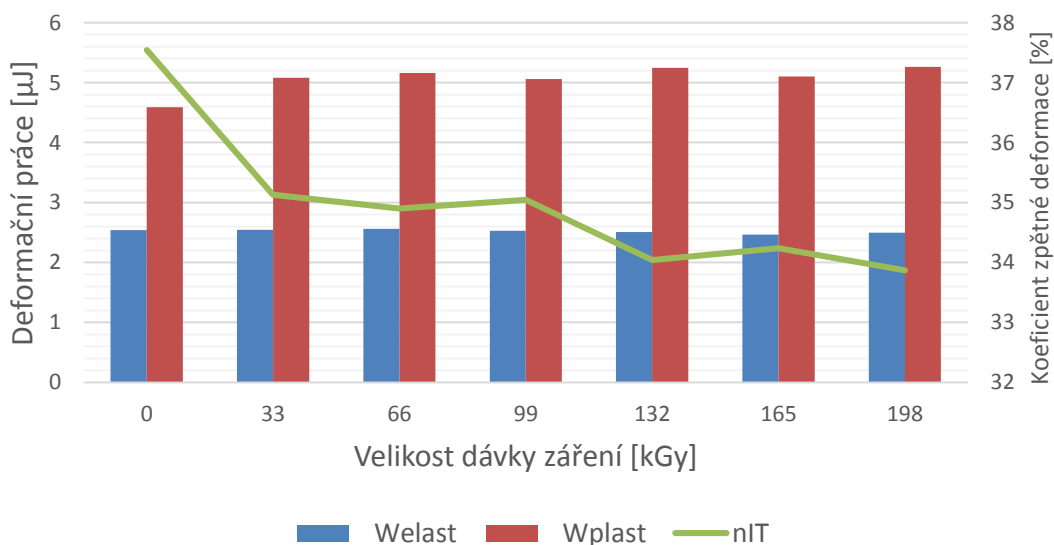
1. Zatížení indentoru 0,5 N



Obr. 43 Deformační práce při zatížení 0,5 N

Z obrázku 43 je zřejmé, že nejvyšších hodnot částí plastické a elastické deformační práce bylo dosaženo u dávky záření 198 kGy. Naopak nejnižší hodnoty obou složek byly naměřeny u neozářených zkušebních těles. Při porovnání výsledků s tvrdostí (obr. 33), je patrný pokles W_{elast} a W_{plast} s nárůstem tvrdosti. U koeficientu zpětné deformace bylo dosaženo nejvyšších hodnot u neozářených zkušebních těles, naopak nejnižší hodnoty vykazovaly vzorky ozářené dávkou 198 kGy.

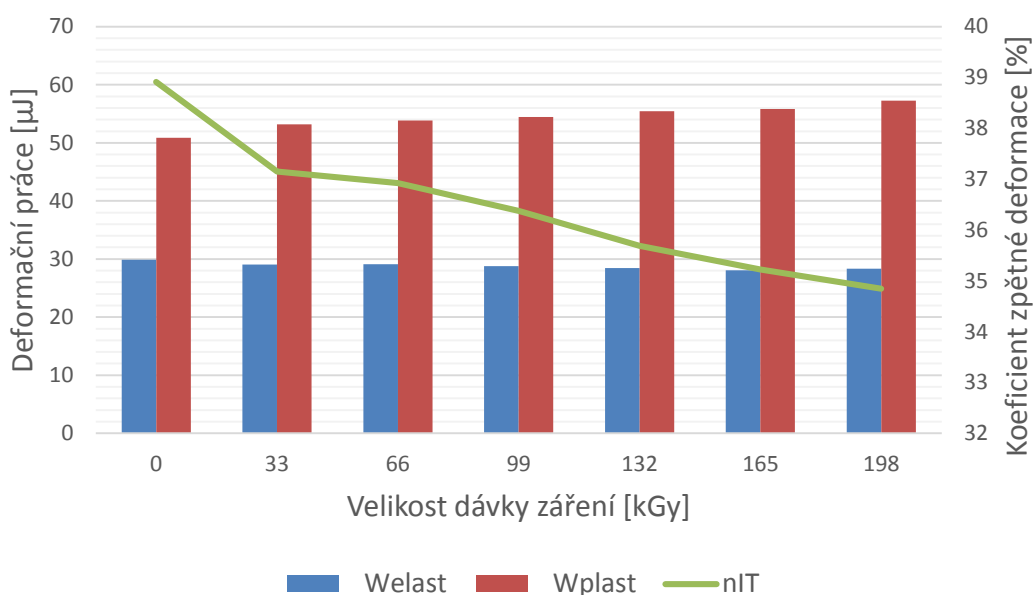
2. Zatížení indentoru 1 N



Obr. 44 Deformační práce při zatížení 1 N

Při zvýšeném zatížení indentoru 1 N nejvyšší hodnoty částí plastické a elastické deformační práce byly opět naměřeny u zkušebních těles ozářených dávkou 198 kGy a nejmenší hodnoty byla naměřena u neozářených zkušebních těles (Obr. 44). Je však nutno podotknout, že hodnoty u tohoto zatížení značně kolísaly. Koeficient zpětné deformace byl zase naměřen nejmenší u dávky záření 198 kGy a nejmenší u neozářených zkušebních těles.

3. Zatížení indentoru 5 N



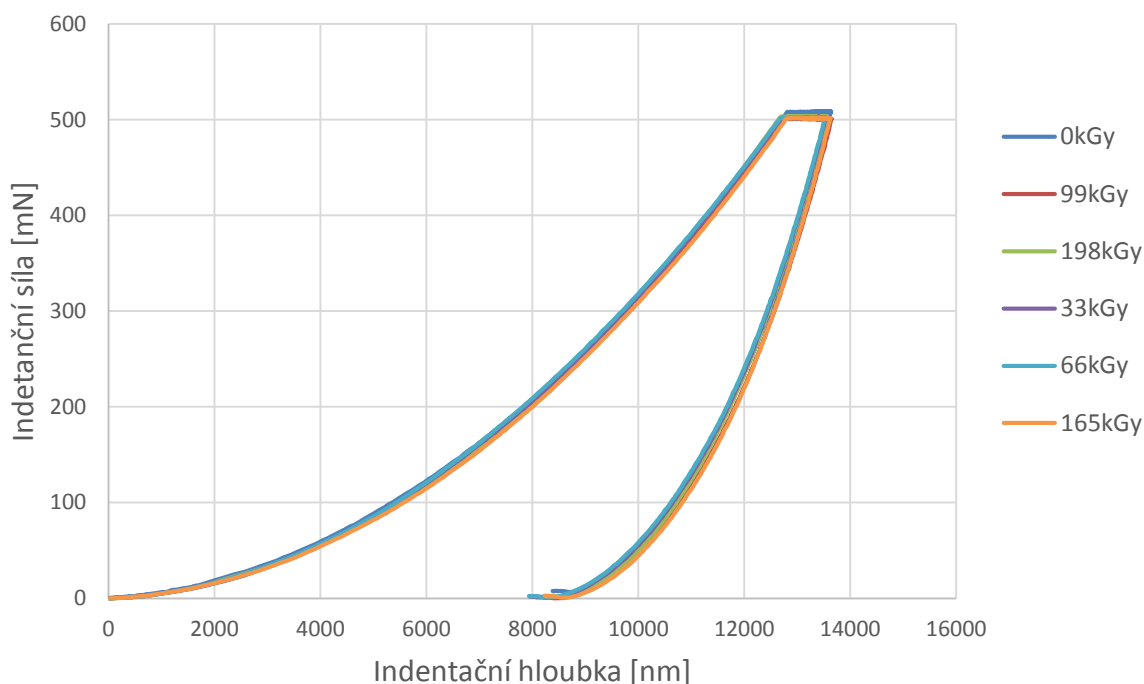
Obr. 45 Deformační práce při zatížení 5 N

Při nejvyšším zatížení indentoru 5 N viz. Obr. 45 byly výsledky opět obdobné jako u předchozích zatížení. Nejmenší naměřené hodnoty částí plastické a elastické deformační práce vykazovaly neozářené zkušební tělesa a naopak nejvyšší hodnoty byly zjištěny u zkušebních těles ozářených dávkou 198 kGy. Koeficient zpětné deformace byl zase naměřen nejmenší u dávky záření 198 kGy a nejmenší u neozářených zkušebních těles.

9.7 Indentační křivky

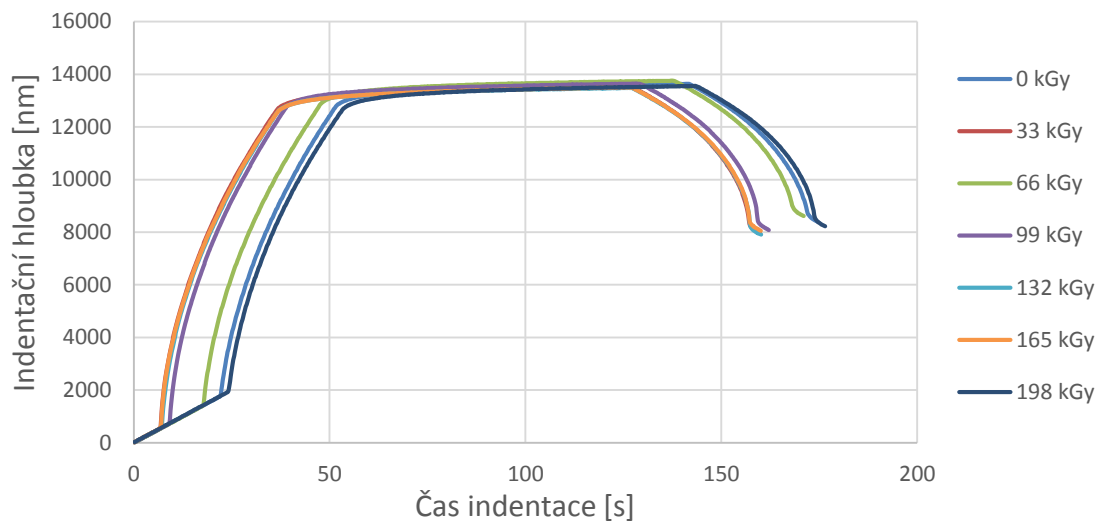
Indentační křivky znázorňují závislost indentační síly na indentační hloubce a indentační hloubku na čase indence. Tyto křivky jsou hlavním výstupem použité metody měření DSI. Pro přehlednost byly grafy hodnot opět rozděleny do skupin podle velikosti zatěžující síly indentoru.

1. Zatížení indentoru 0,5 N



Obr. 46 Závislost indentační síly na indentační hloubce při zatížení 0,5 N

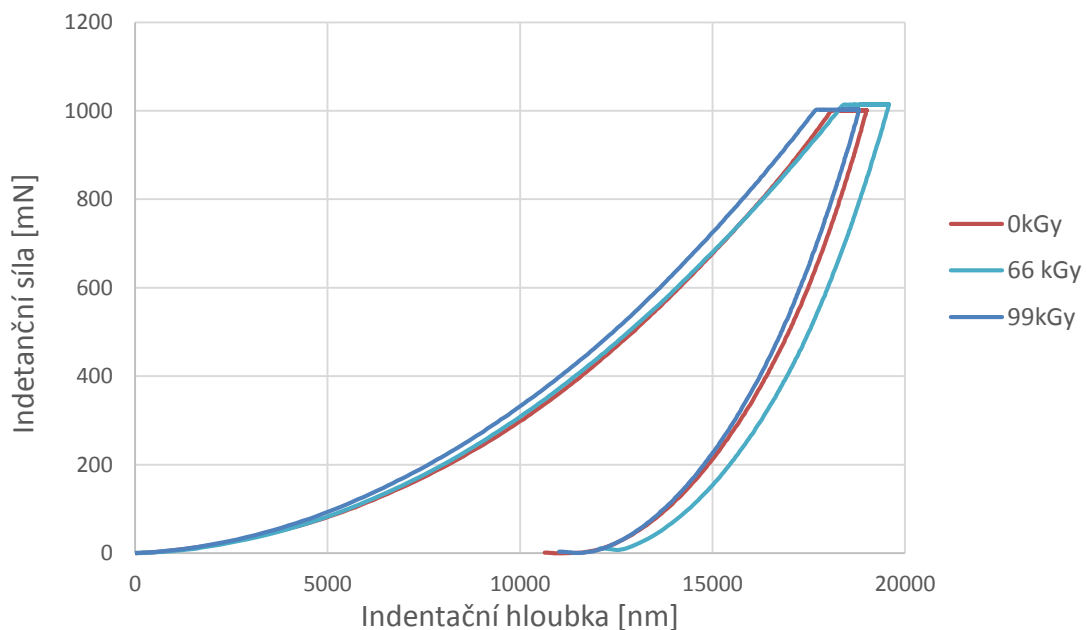
Na obrázku 46 a 47 jsou graficky znázorněny indentační křivky stanovené metodou DSI. Z obrázku 46 je patrné, že při zatížení indentoru 0,5 N byly zachyceny pouze nepatrné rozdíly. V tomto případě nebyl zjištěn vliv dávky ozáření na změnu mechanických vlastností PC.



Obr. 47 Závislost indentační hloubky na čase indentace při zatížení 0,5 N

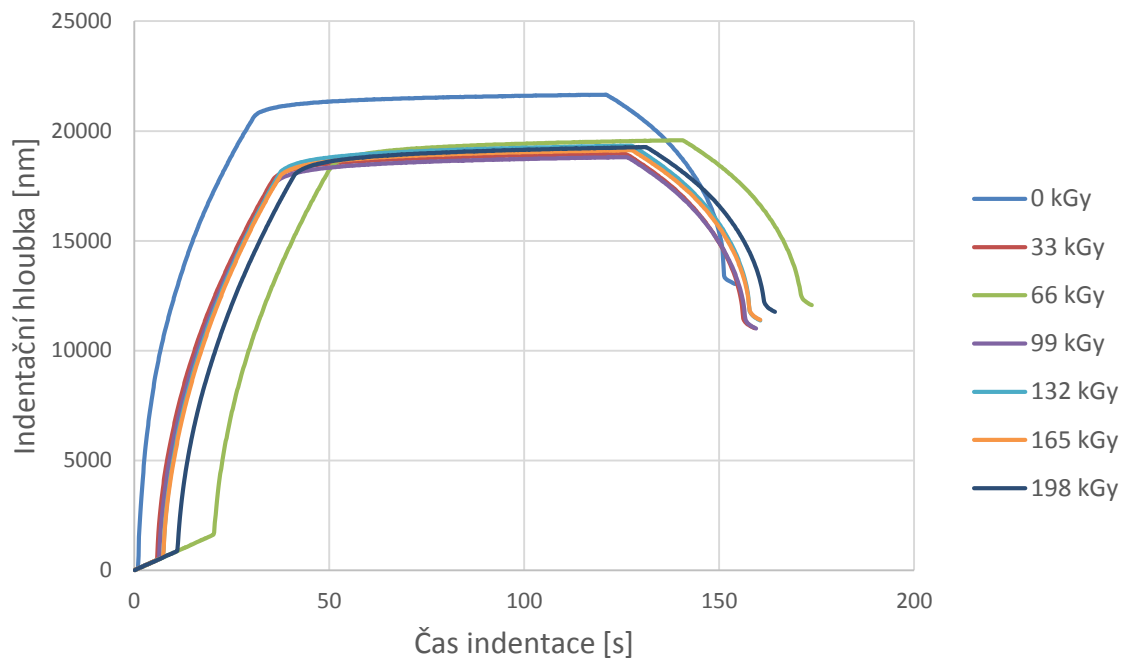
Z obrázku 47 je patrné, že se rostoucí dávkou ozáření mírně mění creepové chování. Tento výsledek koresponduje s výsledky vtiskového tečení (Obr. 39).

2. Zatížení indentoru 1 N



Obr. 48 Závislost indentační síly na indentační hloubce při zatížení 1 N

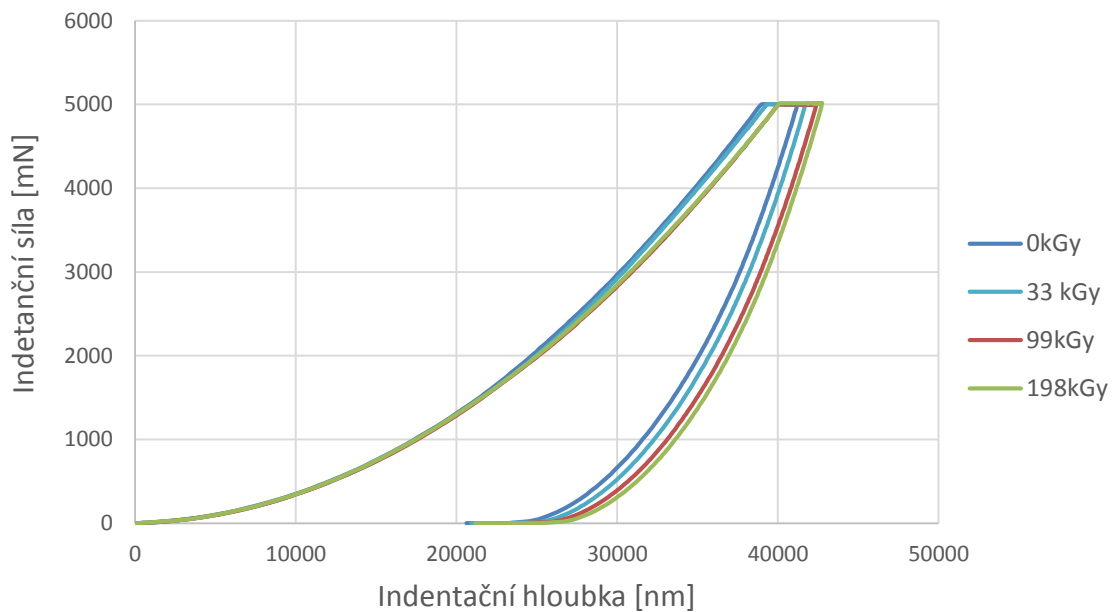
Při zatížení 1 N byly opět stanoveny metodou DSI indentační křivky. V obrázku 48 byly pro názornost znázorněny pouze hodnoty neozařených zkušebních těles a ozářených dávkami 66 a 99 kGy. Rozdíl indentačních hloubek neozařeného a ozářeného zkušebního vzorku byly přibližně 800 nm.



Obr. 49 Závislost indentační hloubky na čase indentace při zatížení 1 N

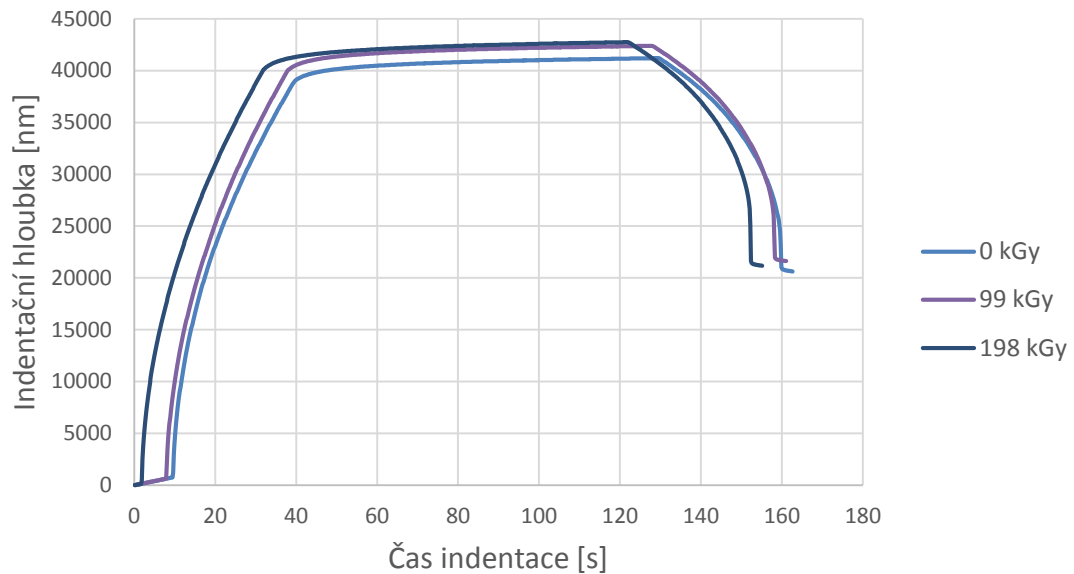
Na obrázku 49 je vidět jak se mění indentační hloubka na čase indentace, z toho vyplývá, že ozařováním se mění creepové chování sledovaného polymeru. Dále je vidět změna indentační hloubky ozářených zkušebních těles oproti neozářeným a to o 2000 nm.

3. Zatížení indentoru 5 N



Obr. 50 Závislost indentační síly na indentační hloubce při zatížení 5 N

Při zatížení 5 N byly opět stanoveny indentační křivky metodou DSI. Z obrázku 50 je vidět jak s rostoucí dávkou záření roste indentační hloubka. Rozdíl mezi indentační hloubkou neozářeného PC a ozářeného dávkou 198 kGy byla 1200 nm.



Obr. 51 Závislost indentační hloubky na čase indentace při zatížení 5 N

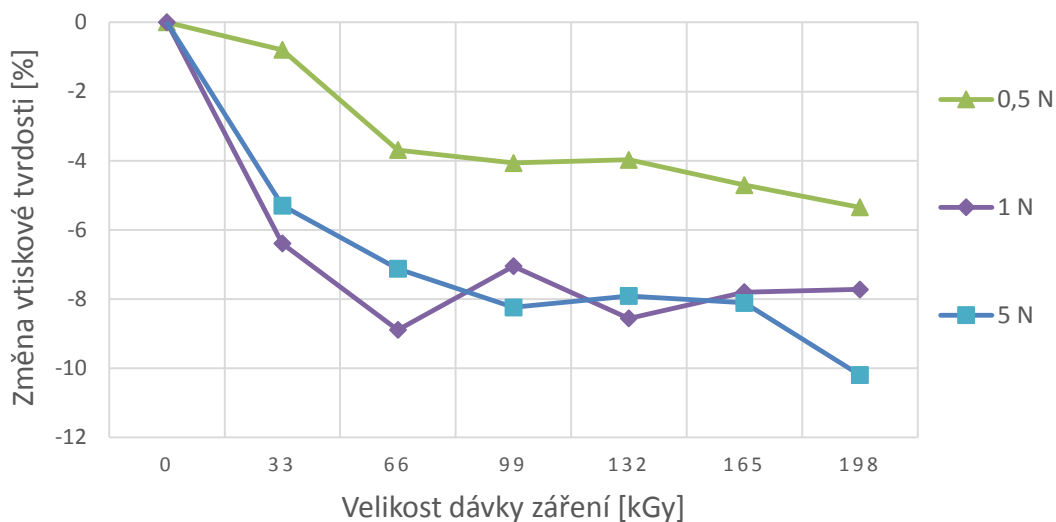
Na obrázku 49 je vidět jak se mění indentační hloubka na čase indentace, z toho vyplývá, že ozařováním se mění creepové chování sledovaného polymeru. I v tomto případě byly naměřeny rozdíly v indentační hloubce ozářených a neozářených zkušebních těles až 2000 nm.

10 DISKUSE VÝSLEDKŮ

V této kapitole jsou porovnávány výsledky z předešlé kapitoly.

10.1 Vtisková tvrdost

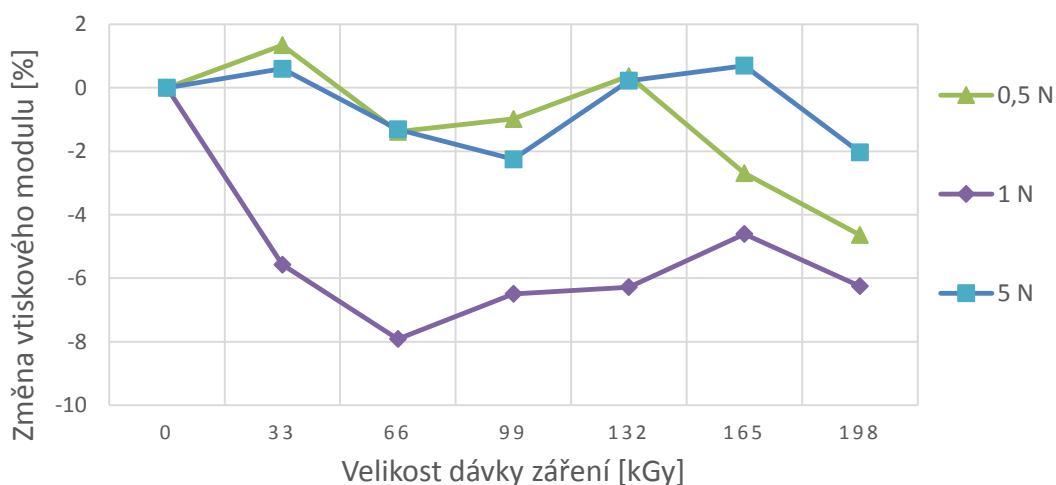
Hodnoty byly procentuálně porovnávány s neozářenými zkušebními tělesy PC.



Obr. 52 Srovnání výsledků vtiskové tvrdosti při různých zatížení

Z výsledků měření mikrotvrdomosti vyplývá, že vtisková tvrdost byla při všech třech zatíženích největší u neozářeného PC. S rostoucí dávkou ozáření tato hodnota mírně klesala až po maximální dávku záření 198 kGy, kde byla naměřená vtisková tvrdost nejmenší. Průměrně tento pokles při dávce záření 198 kGy činil 8%.

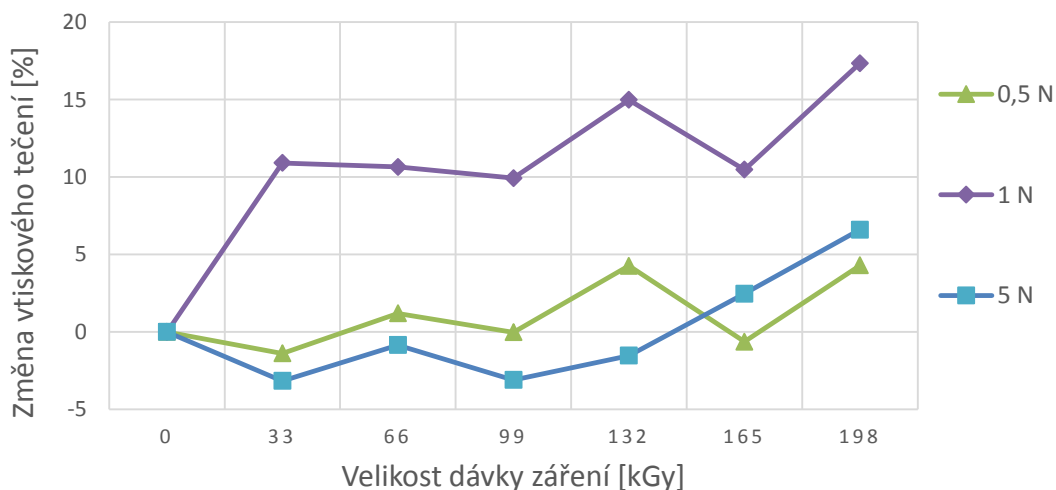
10.2 Vtiskový modul



Obr. 53 Srovnání výsledků vtiskového modulu při různých zatížení

Z obrázku 53 je zřejmé, že hodnoty vtiskového modulu s rostoucí dávkou ozáření mají snahu klesat podobně, jako tomu bylo u vtiskové tvrdosti, až na pár mírně kolísajících hodnot. Průměrný pokles ozářených zkušebních těles dávkou 198 kGy oproti neozářeným byl 4,3%.

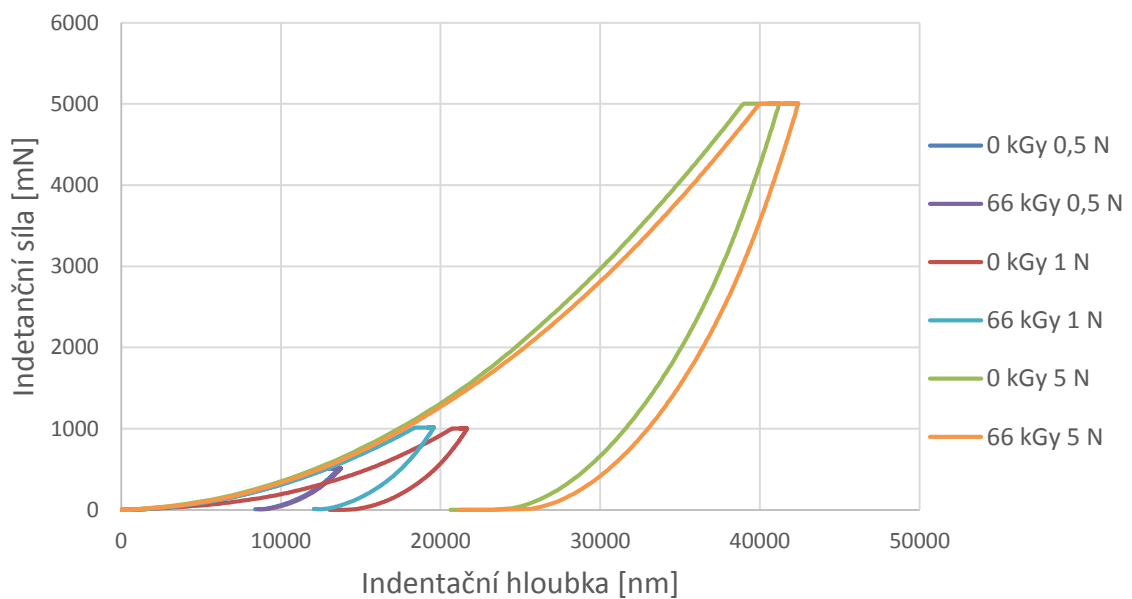
10.3 Vtiskové tečení



Obr. 54 Srovnání výsledků vtiskového tečení při různých zatíženích

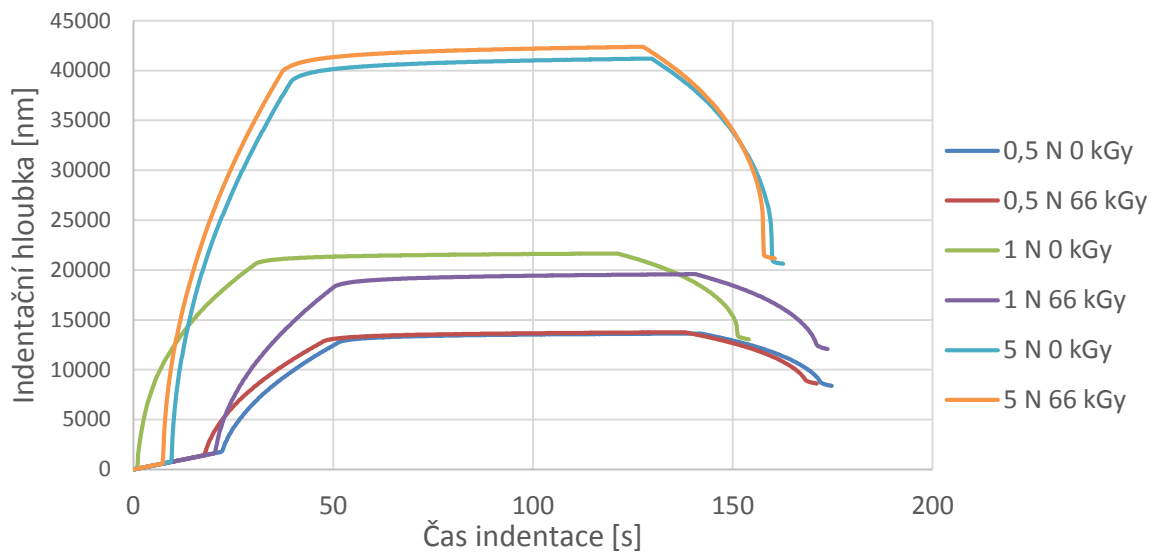
U vtiskového tečení byl trend s rostoucí dávkou spíše rostoucí, než jak tomu bylo u vtiskového modulu a tvrdosti jak je patrné z obrázku 54. Nejvyšší naměřené hodnoty byly u zkušebních těles ozařovaných dávkou velikosti 198kGy, a nejmenší naopak u neozařeného PC a u nejmenší dávky 33kGy. Hodnoty při zatížení indentoru 1 N vykazovaly nárůst vtiskového tečení až 17%.

10.4 Porovnání mikro-mechanických vlastností



Obr. 55 Indentační křivky při různých zatížení

Na obrázcích 55 a 56 jsou graficky znázorněny indentační charakteristiky stanovené metodou DSI. Z obrázku 55 jsou graficky porovnávány průběhy indentačních křivek neozařeného a ozařeného PC dávkou 66 kGy. Tato dávka byla zvolena, jelikož se nejvíce vchylovala oproti ostatním hodnotám.



Obr. 56 Indentační křivky při různých zatížení

Z obrázku 56 je patrné že tečení tedy creep se nejvíce měnil u zatížení indentoru o velikosti 1 N.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo měření vybraného typu PC modifikovaného ionizačním zářením (beta zářením) o dávkách 33, 66, 99, 132, 165, 198 kGy a následného porovnávání s neozářenými zkušebními tělesy. Teoretická část se zabývá síťováním polymerů a zkouškami tvrdosti. V praktické části probíhalo vyhodnocení měřené mikrotvrdosti modifikovaného PC. Na každém zkušebním tělese bylo provedeno 10 měření. Naměřené výsledky byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplynulo, že u hodnot vtiskové tvrdosti je se zvyšující se dávkou ozáření patrný její pokles. Nejvyšší pokles byl zaznamenán u dávky ozáření 198 kGy a činil v průměru 8%.

U vtiskové modulu pružnosti, který reprezentuje tuhost testované povrchové vrstvy, byly jištěny podobné výsledky. Rovněž zde, s rostoucí dávkou ozáření klesá tuhost testovaného zkušebního tělesa. Nejvyšší pokles byl naměřen u dávky ozáření 198 kGy a to v průměru o 4%.

Opačný vliv mělo ionizační záření na hodnotu vtiskového tečení, u kterého bylo naměřeno, že s rostoucí dávkou roste. Nejvyšší naměřené hodnoty byly u zkušebních těles ozařovaných dávkou velikosti 198 kGy, a nejmenší naopak u neozářeného PC a u nejmenší dávky 33 kGy. Nárůst vtiskového tečení u dávky 198 kGy činil v průměru 9% oproti neozářenému PC.

Deformační práce vnikacího procesu také rostla s velikostí dávky ozáření. Nejmenší hodnota byla naměřena u neozářeného PC a naopak nejvyšší hodnota byla při ozáření 198 kGy.

Z naměřených hodnot je zřejmé, že s rostoucí dávkou ozáření se zmenšují hodnoty mikrotvrdosti měřeného polykarbonátu. Radiační síťování polykarbonátu má tedy negativní vliv na jeho vlastnosti a není tedy výhodné tuto modifikaci na daný polymer aplikovat. Je tomu nejspíše proto, že se vazby mezi makromolekulami spíše odstraňují, než aby se tvořily nové a to má negativní vliv na mechanické vlastnosti měřeného polykarbonátu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 8070806176.
- [2] SOVA, Miloš. *Termoplasty v praxi*. 1. vyd. Praha: Dashöfer, 1999. ISBN 80-862-2915-7.
- [3] Katedra strojírenské technologie v Liberci [online]. [cit. 2015-04-24]. *Produkce plastů*. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c1/ZPL1.pdf>
- [4] DANĚK, Michal. *Vliv záření na vlastnosti polymerů*: Disertační práce, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, Technologická fakulta, 2013. Školitel disertační práce Doc. Ing. David Mañas, CSc.
- [5] FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 189 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-193-3.
- [6] Skupina ČEZ, [online]. [cit. 2015-04-16]. *Druhy ionizujícího záření*. Dostupný z WWW: <http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/druhy_5.html>
- [7] BGS – Beta Gama Service. [online]. [cit. 2015-03-09]. Dostupný z WWW: <<http://bgs.eu>>
- [8] MAKUUCHI, Keizou a Song CHENG. *Radiation processing of polymer materials and its industrial applications*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011, xxviii, 415 p. ISBN 978-047-0587-690.
- [9] HRBÁČ, Jaroslav. *Vliv radiačního síťování na creepové chování polymerů*: Diplomová práce, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, Technologická fakulta 2011. Školitel diplomové práce Doc. Ing. David Mañas, Csc.
- [10] HUŠÁK, Václav. *Zdroje ionizujícího záření* [online]. [cit. 2015-04-13]. <http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch01.htm>
- [11] *Cobalt-60* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/123260/cobalt-60>>
- [12] MEISSNER, B.; ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů. Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1987. ISBN 04-634-87

- [13] MÜLLER, M., PERTRŽELKA, Z.,: *Strojírenská technologie část I. – II.* OMTO Olomouc, 2011, 125 s.
- [14] MACHÁČ, Miroslav. *Měření tvrdosti a zpracovávání zjištěných hodnot*: Bakalářská práce, VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství 2010. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda
- [15] Měření tvrdosti [online]. [cit. 2015-04-16]. *Tvrдост*. Dostupný z WWW: <<http://www.merenitvrlosti.cz/tvrдост.html>>
- [16] OVSÍK, Martin. *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů*: Disertační práce, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, Technologická fakulta, 2013. 179 l. Školitel disertační práce Ing. David Maňas, Ph.D.
- [17] ŠVEC, Jiří. *Radioaktivita a ionizující záření: doplňující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005, 36 s. ISBN 80-86634-62-0.
- [18] Wikipedia [online]. [cit. 2015-04-21]. *Ionizující záření*. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ionizující_záření>
- [19] DOLEŽAL, P., PACAL, B.,: *Hodnocení mikrotvrlosti struktur materiálu*. VUT Brno: Fakulta strojního inženýrství, 2006. 41s.
- [20] MATOCHA, Petr. *Vliv beta záření na mikro-mechanické vlastnosti plněného PBT*: Diplomová práce, Zlín: univerzita Tomáše Bati, fakulta Technologická, 2014, Vedoucí práce Ing. Martin Ovsík.
- [21] ČSN EN ISO 14577-1. *Kovové materiály-instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů-Část 1:Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 31s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	Úhel indentoru
λ	Přeměnová konstanta
ν_i	Poissonův poměr vnikacího tělesa
ν_s	Poissonův poměr
A	Skutečná plocha
c	Rychlost elektromagnetického záření ve vakuu
C_{IT}	Vtiskové tečení
d	Střední průměr vtisku
D	Průměr kuličky
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti (Depth Sensing Indentation)
E	Youngův modul
E_α	Energie alfa částic
E_i	Modul vnikacího tělesa
E_{IT}	Vtiskový modul
E^*	Komplexní modul
E_r	Redukovaný modul
F	Zatěžující síla
g	Gravitační zrychlení
h	Hloubka vtisku
h_c	Hloubka indentace
h_{max}	Maximální indentační hloubka
H	Tvrdost
HBS	Tvrdost podle Brinella při použití kalené kuličky
HBW	Tvrdost podle Brinella při použití kuličky se slinutých karbidů

H_{IT}	Vtisková tvrdost
HR	Tvrdost podle Rockwella
HV	Tvrdost podle Vickerse
l	Délka delší úhlopříčky vtisku
n_{it}	Koeficient zpětné deformace
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
POM	Polyoximetylén
PE-LD	Nízkohustotní polyethylen
PE-HD	Vysokohustotní polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PS	Polystyren
EPS	Lehčený polystyren
PA	Polyamid
PET	Polyethylentereftalát
PUR	Polyuretan
W_{elast}	Elastická část deformační práce
W_{plast}	Plastická část deformační práce
W_{total}	Deformační práce

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1]</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 2 Schematické znázornění makromolekul [1]</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 3 Syntéza polykarbonátu [2]</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 4 Světová spotřeba konstrukčních termoplastů (r. 2010) [3]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 5 Druhy ionizujícího záření [6]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 6 Pronikavost ionizujícího záření [6]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 7 Částice alfa [18]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 8 Beta záření [18]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 9 Záření gama [18]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 10 Schéma vzniku sítě [12]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 11 Princip radiačního síťování [16]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 12 Radiačně síťovatelné polymery [7]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 13 Vybrané vlastnosti plastů v závislosti na velikosti dávce ozáření [7]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 14 Síťování pomocí beta záření [16]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 15 Cyklický elektronový urychlovač Rhodotron [7]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 16 Síťování pomocí gama záření [16]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 17 Princip zkoušky podle Brinella [14]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 18 Příklad zkoušky tvrdosti podle Rockwella (HRB, HRC) [15]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 19 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [14]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 20 Zkouška tvrdosti podle Knoopu [14]</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 21 Indentační křivka (a), časový diagram indentační zkoušky (b) [16]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 22 Průběh zatěžování a odlehčování indentoru [16]</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 23 Nespojitý průběh indentačních křivek [16]</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 24 Závislost indentační hloubky na čase [16]</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 25 Závislost velikosti síly na čase [16]</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 26 Charakteristické tvary indentačních křivek pro různé materiály [16]</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 27 ARBURG ALLROUNDER 420C</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 28 Rozměry zkušebního tělesa</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 29 Linka na ozařování</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 30 Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 31 Moduly pro Micro-Combi Tester</i>	<i>49</i>

<i>Obr. 32 Tvrdoměr Micro-Combi Tester</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 33 Vtisková tvrdost při zatížení 0,5 N.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 34 Vtisková tvrdost při zatížení 1 N.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 35 Vtisková tvrdost při zatížení 5 N.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 36 Vtiskový modul při zatížení 0,5 N.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 37 Vtiskový modul při zatížení 1 N.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38 Vtiskový modul při zatížení 5 N.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 39 Vtiskové tečení při zatížení 0,5 N</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 40 Vtiskové tečení při zatížení 1 N</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 41 Vtiskové tečení při zatížení 5 N</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 42 Deformační práce [21]</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 43 Deformační práce při zatížení 0,5 N</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 44 Deformační práce při zatížení 1 N</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 45 Deformační práce při zatížení 5 N</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 46 Závislost indentační síly na indentační hloubce při zatížení 0,5 N</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 47 Závislost indentační hloubky na čase indentace při zatížení 0,5 N</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 48 Závislost indentační síly na indentační hloubce při zatížení 1 N</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 49 Závislost indentační hloubky na čase indentace při zatížení 1 N</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 50 Závislost indentační síly na indentační hloubce při zatížení 5 N</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 51 Závislost indentační hloubky na čase indentace při zatížení 5 N.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 52 Srovnání výsledků vtiskové tvrdosti při různých zatížení</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 53 Srovnání výsledků vtiskového modulu při různých zatížení</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 54 Srovnání výsledků vtiskového tečení při různých zatíženích</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 55 Indentační křivky při různých zatížení.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 56 Indentační křivky při různých zatížení.....</i>	<i>69</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Světová spotřeba termoplastů (Evropa, Severní Amerika a Asie) [3]</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 2 Materiálové vlastnosti PC</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 3 Procesní parametry při vstřikování</i>	<i>46</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PI CD-Rom