

Měření mikrotvrdosti polymerů modifikovaných beta zářením

Bc. Jaroslav Rudolf

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Baťa ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav Rudolf**
Osobní číslo: **T12447**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření mikrotvrdosti polymerů modifikovaných beta záření**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava zkušebních vzorků na experimentální část.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

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

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: Rudolf Jaroslav

Obor: KTZ

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 3.5.2014

.....
Rudolf

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 nevydělečně 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). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá měřením mikrotvrdomosti polymerů modifikovaných beta zářením. Modifikace polypropylenu pomocí beta zářením byla popsána již v mnoha publikacích. Velmi zajímavým problémem se jeví ovlivnění povrchové vrstvy při modifikaci polypropylenu beta zářením. Zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování a následně ozářena beta zářením o dávkách 0, 33, 66 a 99 kGy. Změny mikromechanických vlastností povrchové vrstvy byly měřeny instrumentovanou zkouškou mikrotvrdomosti při zatížení 0.5N, 1N a 5N. Výsledky měření ukázaly výrazné změny mikromechanických vlastností povrchové vrstvy testovaného polypropylenu modifikovaného beta zářením. Byl zaznamenán nárůst hodnot vtiskové tvrdosti až o 50%.

Klíčová slova: tvrdost, mikrotvrdomost, Instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI), modifikace polymerů, beta záření

ABSTRACT

The thesis deals with measuring microhardness of polymers modified by beta rays. Modification of polypropylene by beta rays has already been described in many publications. Very interesting problem seems to be interference of surface layer after modification by beta rays. Test objects were made by injection technology and then irradiated by beta rays of doses 0, 33, 66 and 99 kGy. Changes of micromechanical properties were measured by Depth-Sensing Indentation with loads 0.5N, 1N and 5N. Results showed significant changes of micromechanical properties on surface layer of tested polypropylene, which was modified by beta rays. We recorded increase of indentation hardness up to 50%.

Keywords: hardness, microhardness, Depth-Sensing Indentation (DSI), modification of polymers, beta rays

PODĚKOVÁNÍ

Velice děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, materiální podklady k práci, dohled a pomoc, které mi poskytoval při vypracování této diplomové práce.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jen citovanou literaturu a elektronické zdroje.

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

Ve Zlíně

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TVRDOST	12
1.1 MIKROTVRDOST	12
1.2 ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK TVRDOSTI.....	13
1.3 INDENTAČNÍ KŘIVKA	14
1.4 ZKUŠEBNÍ TĚLESO	15
2 ROZDĚLENÍ A POPIS ZKOUŠEK TVRDOSTI	17
2.1 STATICKE ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	17
2.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella.....	17
2.1.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	19
2.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	20
2.1.4 Zkouška tvrdosti podle Knoopu	21
2.2 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	22
2.2.1 Zkouška tvrdosti podle Shorea.....	23
2.2.2 Zkouška tvrdosti kyvadlovou metodou.....	24
2.2.3 Zkouška tvrdosti kladívkem Poldi	25
2.2.4 Zkouška tvrdosti Baumannovým kladívkem	26
2.3 VRYPOVÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	27
2.3.1 Zkouška tvrdosti podle Mohse	27
2.3.2 Zkouška tvrdosti podle Martense	28
2.3.3 Zkouška tvrdosti podle Stocka	28
3 ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI	29
3.1 MIKROTVRDOST PODLE VICKERSE	29
3.2 MIKROTVRDOST PODLE KNOOPA	30
3.3 MIKROTVRDOST PODLE BERKOVICE.....	30
4 MODIFIKACE POLYMERŮ	32
4.1 FYZIKÁLNÍ MODIFIKACE	32
4.2 MECHANOCHEMICKÁ MODIFIKACE.....	32
4.3 CHEMICKÁ MODIFIKACE.....	33
5 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ	34
5.1 ZÁŘENÍ ALFA.....	35
5.2 ZÁŘENÍ BETA.....	36
5.3 ZÁŘENÍ GAMA	36
5.4 NEUTRONOVÉ ZÁŘENÍ	37
5.5 RENTGENOVÉ ZÁŘENÍ.....	38
6 POLYMERNÍ MATERIÁLY	40
6.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	40
6.1.1 Termoplasty.....	41
6.1.2 Reaktoplasty	41
6.1.3 Elastomery (kaučuk)	41

6.2	SYNTÉZA POLYMERŮ	42
6.2.1	Polymerace	42
6.2.2	Polykondenzace.....	42
6.2.3	Polyadice	43
6.3	ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY VÝROBY POLYMERŮ	43
6.3.1	Bloková polymerace.....	43
6.3.2	Roztoková polymerace.....	43
6.3.3	Emulzní polymerace.....	44
6.3.4	Suspenní polymerace.....	44
II PRAKTICKÁ ČÁST		45
7	STANOVENÍ CÍLU DIPLOMOVÉ PRÁCE	46
8	CHARAKTERISTIKA POUŽITÉHO MATERIÁLU	47
8.1	POLYPROPYLEN	47
8.1.1	Výroba polypropylenu	47
8.1.2	Zpracování polypropylenu	48
8.1.3	Vlastnosti polypropylenu	48
8.1.4	Molekulární struktura polypropylenu	49
8.1.5	Využití polypropylenu	50
9	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	52
10	OZAŘOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	53
11	INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI	54
12	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	55
12.1	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI PŘI ZATÍŽENÍ 0,5 N.....	55
12.2	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI PŘI ZATÍŽENÍ 1 N.....	59
12.3	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI PŘI ZATÍŽENÍ 5 N.....	62
13	DISKUZE VÝSLEDKŮ	65
13.1	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MIKROTVRDOSTI PŘI RŮZNÝCH ZATĚŽUJÍCÍCH SILÁCH	65
ZÁVĚR		70
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		71
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		73
SEZNAM OBRÁZKŮ		74
SEZNAM TABULEK.....		76

ÚVOD

Tato diplomová práce je zaměřena na měření mikrotvrdomosti polymerů modifikovaných beta zářením. To znamená, jak velké množství beta záření ovlivní mikrotvrdomost polymeru.

Indentační zkoušky jsou přibližně 100 let používané pro vyhodnocení tvrdosti materiálů. Vzhledem k rostoucí potřebě hodnotit mechanické vlastnosti materiálů, jako je tvrdost materiálů, ve velmi malých objemech (tenké vrstvy, nanostrukturní materiály), byly vyvinuty mikrotvrdoměry.

Mikrotvrdomost je odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Zkoušky mikrotvrdomosti jsou používány pro určení tvrdosti jednotlivých struktur materiálu polymeru. Měření se musí provádět za přesně stanovených podmínek.

V teoretické části je popsáno, co je to tvrdost a mikrotvrdomost a následně rozdělení jednotlivých metod měření tvrdosti. Dále jsou popsány jednotlivé metody měření mikrotvrdomost, modifikace polymerů a měřený modifikovaný polymer.

V praktické části byl vybrán jako zkušební materiál polypropylen modifikovaný různými dávkami beta záření. Zvolené zatížení bylo 0.5N, 1N a 5N. Naměřené výsledky byly vyhodnoceny a porovnány v grafech.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TVRDOST

Obecně je tvrdost fyzikální pojem pro odpor materiálu, kterým se brání proti vniknutí jiného, tvrdšího tělesa. Tedy vlastností spíše povrchu materiálů a prvé stupnice tvrdosti byly založeny na tom, že zanechává určitý tvrdostní standart ve zkoušeném vzorku stopy po vrypu.

Polymerní materiály jsou však houževnaté, v případě pryže i pružné. Tvrdostní zkoušky se proto vyvinuly v měření odporu celého objemu proti vtlačování tvrdých těles definovaných tvarů. Při měření tvrdosti kovů, které jsou plastické, se vyhodnocuje tvrdost podle velikosti stopy, kterou čidlo na povrchu zanechalo. Vzhledem k viskoelastickému chování polymerů nelze u nich měřit stopu, ale rovnovážnou hloubku vniknutí čidla při určité konstantní síle vtlačování.

Při odporu celého objemu je tvrdost vyjádřením tuhosti a u některých metod jsou dosahovány dobré korelace mezi tvrdostí a modulem pružnosti. Protože pryž má značně nižší modul a rozdílné deformační vlastnosti, jsou konstruovány zvlášť přístroje na stanovení tvrdosti pryže a jiné pro měření tuhých sklovitých polymerů. [1]

V technické praxi se dá tvrdost zjistit pomocí více než stovky druhů mechanických zkoušek. Zkoušky tvrdosti se dělí na statické nebo dynamické. Dále na zkoušky vrypové, vnikací a odrazové. Nejčastěji se vtlačuje zkušební tělísko definovanou silou do testovaného materiálu. Nastává plastická (nevratná) deformace materiálu. Měří se hloubka vniknutí tělíska do materiálu. Jako tělesa se používají kalené ocelové kuličky, ocelové tlouky s diamantovým hrotem, diamantové jehlany a kužele. Měří se hloubka vniknutí do materiálu, případně výška odrazu od materiálu. [2]

Obecně pro zkoušky tvrdosti platí, že zkušební tělesa musí mít takové rozměry, aby výsledek zkoušky nebyl ovlivněn okrajovými efekty, výškou vzorku a tvrdostí podložky. [1]

1.1 Mikrotvrdost

Název mikrotvrdosti se ustálil pro tvrdost určenou použitím zcela malých zatížení, tak aby vznikly vtisky nepatrné velikosti. Často se uvádí 19,8N jako hranice mezi makrotvrdostí a mikrotvrdostí. Mikrotvrdost nelze určovat obvyklými tvrdoměry, neboť vyžaduje nesrovnatelně větší přesnost jak při zatěžování, tak i při proměřování vtisku. Nejpřesnější je přímé zatěžování závažím nebo přesně cejchovanou pružinkou. K proměřování vtisku slouží přesná optika. [3]

Měření mikrotvrdomosti je využíváno na měření tvrdosti velmi malých předmětů, tenkých vrstev, a také i v metalografii na měření tvrdosti jednotlivých strukturních složek. Měření tvrdosti je realizováno vtlačováním diamantového tělesa ve tvaru Vickersova nebo Knoopova jehlanu. Tento jehlan je vtlačován do povrchu měřeného tělesa silami v rozsahu od 1g (0,09807 N) do 1000g (9,8707 N), které působí v kolmém směru stanovenou dobu. Po odlehčení se změří úhlopříčky vtisku. [4]

Pro zkoušky mikrotvrdomosti jsou použitelné jedinečně vnikací metody s diamantovým indentorem. Prakticky přichází v úvahu pouze metody Vickers, Knoop nebo Bierkovic.[3]

Vzhledem k tomu, že při měření mikrotvrdomosti jsou vtisky malé, použití metody je vhodné pro:

- malé a tenké vzorky
- měření tvrdosti vybraných, velmi malých oblastí zkoušeného vzorku
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování
- měření mikrotvrdomosti strukturních složek
- měření křehkých materiálů
- měření tvrdosti velmi tenkých povlaků
- hodnocení svarových spojů [4]

1.2 Rozdělení zkoušek tvrdosti

Podle způsobu porušení povrchu zkoušeného tělesa se dělí zkoušky tvrdosti na:

- Statické

Mezi tyto zkoušky tvrdosti patří:

- Brinellova zkouška
- Rockwellova zkouška
- Vickersova zkouška
- Knoopova zkouška

- Dynamické

Mezi tyto zkoušky tvrdosti patří:

- Kladívko Poldi
- Baumanovo kladívko
- Shoreho skleroskop

- Duroskop
- Metoda pružného odrazu
- Vrypové

Do této zkoušky tvrdosti řadíme:

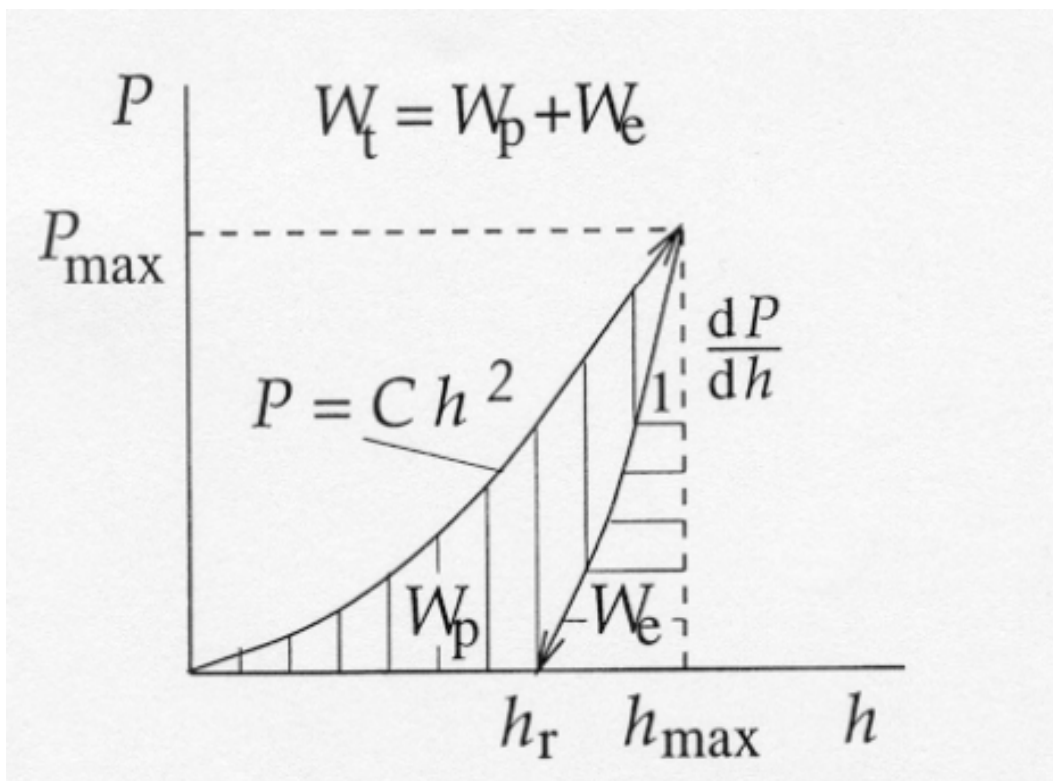
- Zkouška tvrdosti podle Mohse
- Zkouška tvrdosti podle Martense
- Zkouška tvrdosti podle Stocka

1.3 Indentační křivka

Indentační zkoušky jsou téměř 100 let používané pro hodnocení tvrdosti materiálů. Vzhledem k rostoucí potřebě hodnotit mechanické vlastnosti materiálů ve velmi malých objemech (tenké vrstvy, nanostrukturní materiály) byly vyvinuty mikrotvrdoměry a asi před 15-ti lety ultramikrotvrdoměry (nanoindentory), které zaznamenávají závislost zatížení indentoru P a hloubky proniknutí indentoru h během indexace, tzv. indexační křivka. Z indexačních křivek $P(h)$ lze získat množství parametrů pro hodnocení elasticko-plastických a lomových vlastností v malých objemech materiálů. [5]

Je nutné si uvědomit, že materiály lze rozdělit do čtyř skupin podle reakce na vnější silové působení:

- elastické
- plastické
- elasticko – plastické
- viskoplastické [6]



Obr. 1. Indentační křivka [6]

První křivka směřující směrem nahoru, znázorňuje postupné zatěžování zkoušeného materiálu a druhá křivka, která směřuje zpět dolů, znázorňuje odlehčování zkoušeného materiálu. Na ose y se znázorňuje zatížení P , kde můžeme odečíst maximální zatížení P_{max} , dále na ose x je znázorněna hloubka vtisku h , kde můžeme odečíst maximální hloubku vtisku h_{max} při maximálním zatížení a také hloubku vtisku h_r po odlehčení.

1.4 Zkušební těleso

Zkoušky tvrdosti nevyžadují specifické zkušební těleso. Lze použít zkušební tělesa určená pro zkoušky, jako je zkouška tahem nebo rázem v ohybu, případně lze tvrdost měřit přímo na povrchu výrobku. Podmínkou je pouze existence 2 rovnoběžných ploch na vzorku. Lokální nerovnosti na povrchu musí být obroušeny. Vlastnosti, příprava a zpracování zkušebních těles mohou ovlivnit výsledky provedené zkoušky. Přesto však neexistuje jednotný postup jejich přípravy pro všechny materiály. [7]

Zkoušku je nutno provést v oblasti zkoušeného povrchu, která umožní stanovení křivky zatížení/hloubka vtisku v příslušném rozmezí vtisku s požadovanou nejistotou. Na kontaktní ploše se nesmí vyskytovat kapaliny nebo maziva s výjimkou těch, které jsou nezbytné k provedení zkoušky. Tyto musí být podrobně popsány ve zkušebním protokolu. Musí se dbát na to, aby se

na kontaktní ploše nevyskytovaly nežádoucí látky (např. prachové částice). Zkušební povrchy musí být kolmé ke směru zkušebního zařízení. Doporučuje se, aby do výpočtu nejistoty byl zahrnut sklon. Zpravidla je sklon zkušebního povrchu vždy menší než 1° .

V mikro a nano rozsahu se musí, v důsledku malých hloubek vtisku, přijmout zvláštní opatření při přípravě zkušebního tělesa. Je nutno použít leštící proces, který je vhodný pro speciální materiály.[8]

2 ROZDĚLENÍ A POPIS ZKOUŠEK TVRDOSTI

2.1 Statické zkoušky tvrdosti

Indentor se vtlačuje klidnou silou ve směru kolmém ke zkoušenému povrchu. Tyto zkoušky jsou označovány také jako „zkoušky vnikací“. Jsou nejčastější pro svoji přesnost, jednoduchost a dobrou reprodukovatelnost. [3]

Tvrdot je u vnikacích metod definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Vnikací tělesa jsou obvykle jednoduchého geometrického tvaru (koule, kužel, jehlan), nebo tvaru, který se těmto tvarům přibližuje – např. kužel s malým zaoblením vrcholu u některých metod Rockwell. Zvolením těchto tvarů se sledovala jednoduchost a reprodukovatelnost jejich výroby, optimální využití vlastností materiálu vnikacího tělesa (např. tvar vnikacího tělesa Vickers respektuje tvar krystalu diamantu a tak i jeho maximální tvrdost). Volbou tvaru kužele a jehlanu se sledovala možnost stanovování tvrdosti nezávislé na velikosti použité zkušební síly (podobnost vtisků).

Tvrdot u vnikacích metod je definována jako poměr mezi použitým zatížením a plochou vtisku (metody Brinell, Vickers), nebo poměrem mezi použitým zatížením a plochou průmětu vtisku (Knoop). U metod Rockwell je tvrdost určována přímo z trvalé hloubky vtisku. [9]

2.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Zkouška tvrdosti podle Brinella je měření tvrdosti materiálů podle švédského inženýra Johana Augusta Brinella, která patří mezi statické zkoušky tvrdosti materiálu.

Tvrdot podle Brinella se zjišťuje vtláčováním ocelové kalené kuličky o průměru D do zkušebního tělesa silou F , která směřuje kolmo k povrchu tělesa po stanovenou dobu. Následně po odlehčení se měří průměr.

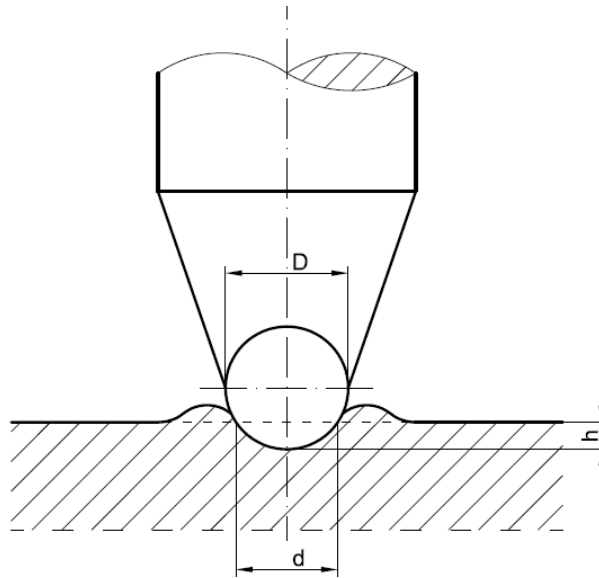
Průměr kuličky závisí na tloušťce t měřeného materiálu. Platí, že minimální tloušťka materiálu je desetinásobek hloubky vtisku. V opačném případě by se mohla projevit tvrdost podložky. [10]

Pro měření tvrdosti tuhých polymerních systémů byla upravena zkouška podle Brinella. Byly zvětšeny průměry měřících kuliček a snížena síla při jejich vtláčování.

Tvrdość Brinell je vyhodnocována vzorcem [1]:

$$H_B = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi D h} [\text{MPa}] \quad (1)$$

kde F je zatěžující síla, A plocha vytlačeného důlku, D průměr kuličky a h hloubka vtisku.



Obr. 2. Měření tvrdosti podle Brinella

Průměr kuličky a zatížení jsou při zkoušce konstantní a proměnnou veličinou je jen hloubka vtisku h , která se odečítá pomocí výškového indikátoru. Tím se zabrání nepřesnému odečítání hloubky nebo průměru vtisku, kterému brání vytvořený návalek.

Tvrdość polymerních materiálů podle Brinella je dána normou ČSN 64 0128, kde jsou podmínky zkoušení následující [1]:

1) průměr kuličky

- 3 mm - pro lamináty, bakelity (reaktoplasty)
- 5 mm - pro většinu termoplastů
- 10 mm – pro měkčené PVC

2) síla

- 49 N – u materiálů s tvrdostí do 200 MPa
- 245 N – u tvrdších materiálů

3) doba odečítání

- 10, 30 a 60 vteřin

4) odečítá se

- hloubka důlku h výškovým indikátorem při zatížení
- průměr důlku d mikroskopem po odlehčení

Odečítá-li se průměr vtisku d , počítá se tvrdost podle vzorce [1]:

$$H_B = \frac{2F}{D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} [\text{MPa}] \quad (2)$$

Výsledek zkoušky tvrdosti obsahuje vedle vlastní hodnoty vypočtené z příslušných vzorců ještě tři čísla, kde první udává průměr kuličky v mm, druhé použitou zatěžující sílu v N a třetí dobu působení síly, např. $H_B (5/49/60) = 21 \text{ MPa}$. [1]

2.1.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Do materiálu se vtlačuje pod zatěžující silou, která působí kolmo na povrch vzorku, diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° mezi protilehlými stěnami po určitou dobu. [1]

Následně se změří střední délka u obou úhlopříček vtisku. Zkušební zatěžující síla bývá od 10 do 1000 N. Doba zatížení se volí od 10 do 180 s. Použité zatížení píšeme do označení, např. HV 100 (HV 100 = 215). [11]

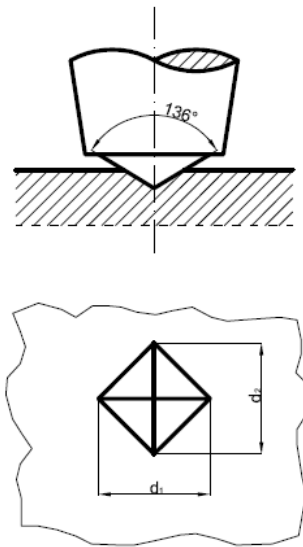
Pro běžně zkušební zatížení 300 N a dobu od 10 do 15 s se používá označení HV.

Tvrdost podle Vickerse se vypočítá ze vzorce [1]:

$$H_V = \frac{F}{A} = \frac{1,8544 F}{d_1^2} [\text{MPa}] \quad (3)$$

$$A = \frac{l^2}{2 \cdot \cos 22^\circ} = \frac{l^2}{1,8544} [\text{mm}^2] \quad (4)$$

kde F je zatěžující síla, A je plocha vtisku a l je délka úhlopříčky.



Obr. 3. Měření tvrdosti podle Vickerse

Předností metody je, že při použití různých zatížení se nemění hodnoty tvrdosti. Úhlopříčka se proměřuje pomocí mikroskopu a byl zkonstruován přístroj, který používá k měření tvrdosti mikrojechlan, který nechává stopu o rozměrech několika μm . Tyto mikrotvrdoměry se používají k proměřování struktury různých polymerních technických dílců, u nichž lze zkoušet jednotlivé strukturní fáze. V takových případech je zařízení úměrně menší a celé zařízení je zamontováno v mikroskopu, který umožňuje změřit s dostatečnou přesností rozměr úhlopříčky. [1]

Pro kontrolování tvrdosti po celou pracovní dobu se používá ve velkých závodech zdokonalených Vickersových tvrdoměrů, tzv. *diatestorů*. Obraz čtvercového vtisku je promítán ve zvětšeném měřítku na matnici. To umožňuje pohodlné a rychlé čtení délky úhlopříčky d . [11]

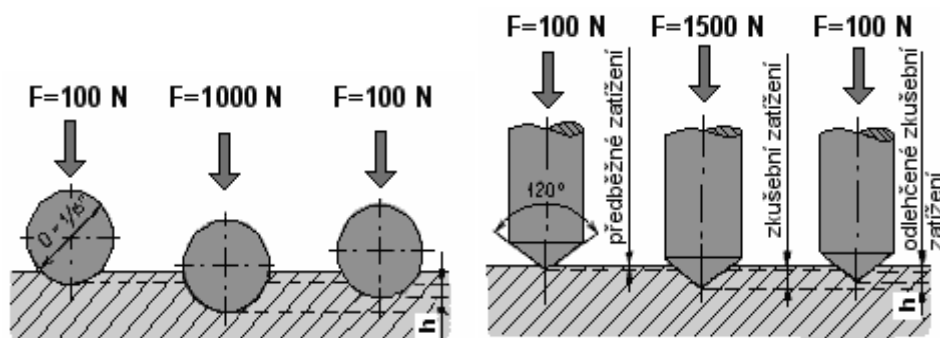
2.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Zkouška tvrdosti se zjišťuje na Rockwellově tvrdoměru jako rozdíl hloubky vtisku vnikacího tělesa (ocelová kulička, diamantový kužel) mezi dvěma stupni zatížení (předběžného a celkového). Účelem předběžného zatížení je vyloučit z měřené hloubky nepřesnosti povrchových ploch.

Kužel má vrcholový úhel 120° a poloměr kulové části 0,2 mm (HRA, HRC). Kulička má průměr 1,5875 mm (HRB).

Značení a provedení jednotlivých druhů zkoušek podle Rockwella:

- HRA - indentorem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° , zkouška probíhá při zatěžování silou 600 N. Vhodná pro testování křehkých materiálů a tenkých vrstev.
- HRB - indentorem je kalená kulička o průměru 1,5875 mm, zkouška probíhá při zatěžování silou 1000 N. Vhodná pro měkké a středně tvrdé materiály.
- HRC - indentorem je opět diamantový kužel, v tomto případě zkouška probíhá při zatěžování silou 1500 N. Vhodná pro tvrdé materiály.



Obr. 4. Měření tvrdosti podle Rockwella

Diamantový kužel nebo ocelovou kuličku, dotýkající se povrchu zkoušeného předmětu, se nejprve předběžně zatíží silou 100 N (výchozí poloha pro měření hloubky vtisku). Potom se pozvolna zvětšuje zatěžovací síla tak, aby se za 3 až 6 sekund dosáhlo zatížení předepsané normou. Pak se zatěžující síla opět zmenšuje až na 100 N a v tomto stavu se zjistí přírůstek h hloubky vtisku, který nastal proti výchozí poloze při 100 N. Zkouška tvrdosti podle Rockwella je rychlá a snadná, vpichy (důlky) jsou velmi malé (max. hloubka 0,2 mm). [12]

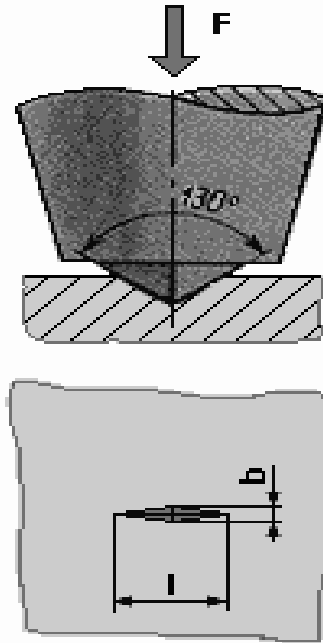
2.1.4 Zkouška tvrdosti podle Knoop

Do povrchu se vtlačuje pod zatěžující silou čtyřboký diamantový jehlan s úhly 130° a $172,5^\circ$. Patří mezi metody měření mikrotvrdosti. Metoda je vhodná pro tenké plastové a kovové desky nebo křehké materiály. Jsou kladeny vysoké nároky na úpravu povrchu zkoušeného tělesa.

Tvrдость podle Knoop se vyjadřuje vztahem[13]:

$$HK = \frac{1,4509 F}{l^2} [-] \quad (5)$$

kde F je zatěžující síla a l je délka delší úhlopříčky vtisku.



Obr. 5. Měření tvrdosti podle Knoop [13]

2.2 Dynamické zkoušky tvrdosti

Indentor proniká do zkoumaného povrchu rázem vedeným kolmo. Dynamické zkoušky tvrdosti se často označují jako „rázové zkoušky“.

V podstatě je třeba rozlišovat rázové zkoušky dvojího druhu. Buď je to zkouška vnikací, u níž je avšak klidné zatěžování nahrazeno rázem, nebo zkouška založená na principu měření velikosti odrazu indentoru spuštěného na zkoušený vzorek určitou energií[3]

Dynamické zkoušky tvrdosti se rozdělují do dvou skupin:

- Dynamicko-elastické zkoušky tvrdosti
- Dynamicko-plastické zkoušky tvrdosti

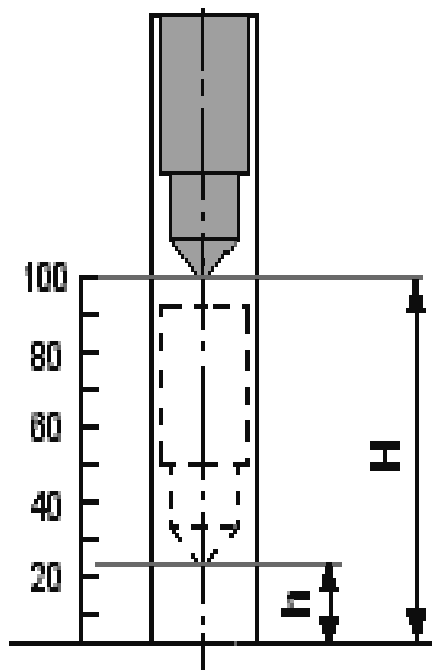
V případě dynamicko-elastické zkoušky tvrdosti nevzniká žádná trvalá deformace (popřípadě jen velmi malá). Tyto zkoušky lze využít hlavně u součástí, na kterých je vytvoření vtisku nepřijatelné. Přesnost zjištěných hodnot tvrdosti však není vysoká.

U dynamicko-plastických zkoušek tvrdosti je cílem vytvořit trvalý vtisk, jehož rozměr slouží k vyhodnocení tvrdosti. Jako indentor je nejčastěji používaná kulička. Nejpoužívanější metody jsou Baumannovo kladívko a kladívko Poldi. [15]

2.2.1 Zkouška tvrdosti podle Shorea

Patří mezi dynamicko-elastické zkoušky. Jedná se o zkoušku odrazem zkušebního tělesa, kdy se zjišťuje výška jeho odskoku od měřené plochy. Touto metodou zjišťujeme tvrdost z velikosti odskoku závaží (kulička, diamantový hrot) spuštěného z určité výše od zkoušeného materiálu. Působením závaží dojde k plastické deformaci zkoušeného materiálu a ke spotřebování části energie závaží. To se pak neodrazí do původní výšky.

Empiricky sestavená stupnice skleroskopu udává přímo hodnotu tvrdosti. Tato metoda je oproti jiným způsobům zjišťování tvrdosti značně nespolehlivá.



Obr. 6. Skleroskop Shore

– Stupnice Shore HSC:

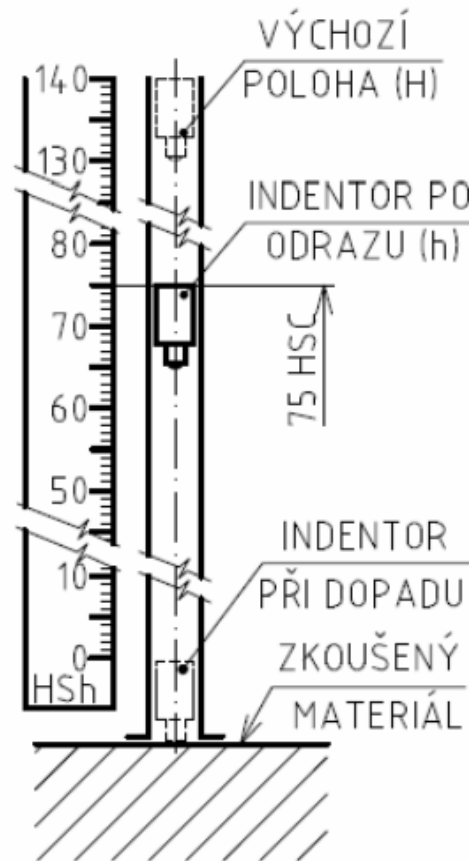
- hmotnost pádového tělesa je 2,5 kg
- pádová výška je 254 mm

$$\text{HSC} = \frac{10^4 h}{65 \cdot H} \quad (6)$$

- Stupnice Shore HSD:
 - hmotnost pádového tělesa je 36,2 g
 - pádová výška je 19 mm

$$HSC = \frac{140 h}{65 H} \quad (7)$$

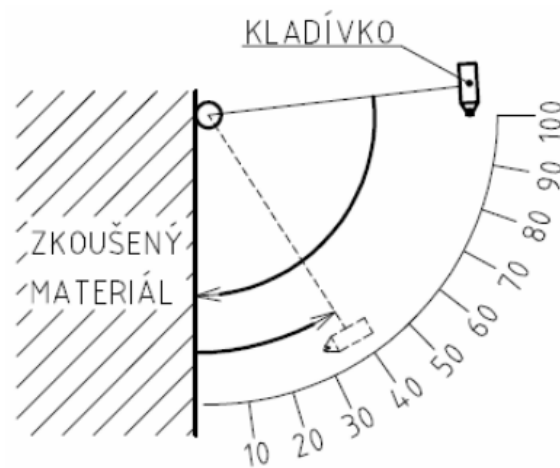
kde H je pádová výška a h je výška odskoku. [14]



Obr. 7 Princip měření tvrdosti Shoreho skleroskopu [15]

2.2.2 Zkouška tvrdosti kyvadlovou metodou

Tato metoda měření tvrdosti se používá pro svislé plochy. Zařízení pro tuto metodu se nazývá duroskop. Duroskop se skládá ze zkušebního kladívka, který má v sobě upevněnou kuličku na čele, která naráží do zkoušeného předmětu. Kladívko padá z určité výšky (úhlu). Po nárazu je vymrštěno opačným směrem. Při odrazu kladívko zachytne ručičku, která zaznamená výšku (úhel) odrazu. Výsledná tvrdost se odečítá přímo na stupnici tvrdoměru pomocí vlečené ručičky.



Obr. 8. Princip měření tvrdosti duroskopem [15]

2.2.3 Zkouška tvrdosti kladívkem Poldi

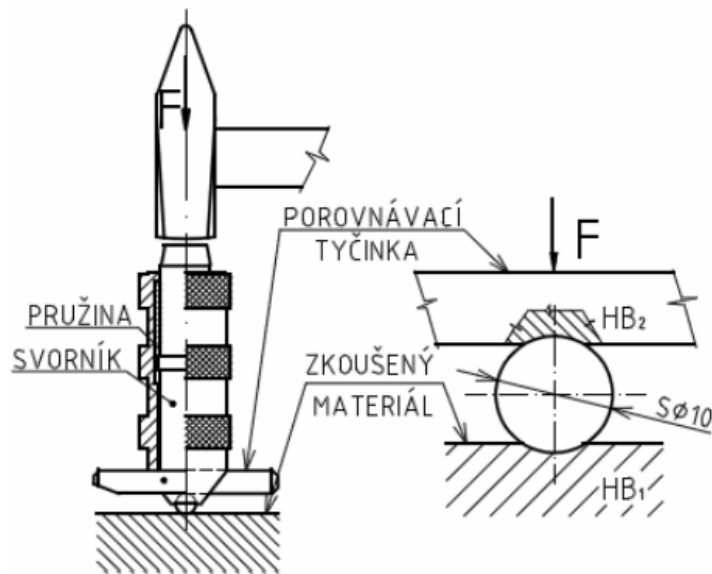
Poldi kladívko je přenosný tvrdoměr o hmotnosti přibližně 0,5 kg. Souprava obsahuje vlastní tvrdoměr, etalon (porovnávací tyčinku), tabulky a lupu pro měření vtisku. Etalon je vyroben z oceli o pevnosti $R_m = 686,5$ MPa. Pokud by byl při zkoušení použit etalon o jiné pevnosti, je nutné výsledek měření zkorigovat.

Přepočítávací koeficient pro jinou pevnost etalonu než 686,5 MPa:

$$k = \frac{R_m}{686,5} \quad (8)$$

Jelikož se jedná o tvrdoměr s nízkou hmotností a malými rozměry je vhodné ho použít pro měření tvrdosti velmi rozměrných součástí. [15]

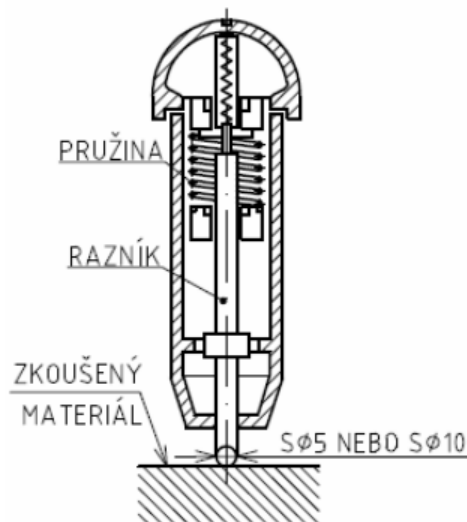
Měření kladívkem Poldi je založeno na srovnávací metodě. Tvrdoměr s vloženou porovnávací tyčinkou, která je přitlačována pružinou k indentoru. Indentor je kulička o průměru 10 mm. Tvrdoměr se přiloží na zkoušený povrch a úderem ručního kladívka na úderník vznikne zároveň vtisk ve zkoušeném materiálu a v porovnávací tyčce známé tvrdosti. Lupou je pak změřen průměr vtisků. Z velikosti obou vtisků se v tabulce odečte tvrdost. [3]



Obr. 9. Princip měření kladívkem Poldi [15]

2.2.4 Zkouška tvrdosti Baumannovým kladívkem

Indentor je kulička o průměru 5 mm nebo 10 mm. Síla, která vtlačí indentor do zkoušeného materiálu je vyvolána uvolněním stlačené pružiny, která má definovanou tuhost. Pružina lze stlačit do dvou různých poloh, tudíž energie rázu je měnitelná. [3]



Obr. 10. Princip měření tvrdosti Baumannovým kladívkem

Pokud zkoušený vzorek nemá dostatečnou hmotnost, pokládá se na masivní podložku o hmotnosti přibližně 40 kg. Na kladívkem se nastaví velikost stlačení pružiny a přiloží se kolmo ke zkoušenému povrchu součásti. Stačením zaobleného konce se pružina uvolní a vymrští razník s kuličkou, která vytvoří ve zkoušeném materiálu vtisk.

Lupou se změří velikost vtisku a podle tabulek se na základě velikosti vtisku určí tvrdost. Baumannovo kladívko je podobně jako Poldi, spíše orientační, protože nejsou přesné. [15]

2.3 Vrypové zkoušky tvrdosti

Porušení je dosaženo pohybem ostrého nástroje rovnoběžně s povrchem zkoušeného tělesa tak, aby se vytvořil vryp. Tento způsob zkoušení tvrdosti se volí u křehkých materiálů, zvláště u minerálů, jako jsou slinuté karbidy, technické sklo, technický porcelán, kalené a jinak tvrzené vrstvy a galvanické povlaky.

2.3.1 Zkouška tvrdosti podle Mohse

Nejnámější vrypovou zkouškou vůbec je posuzování tvrdosti podle Mohsovy stupnice.

Zkoušení tvrdosti kovů vrypem je založeno na myšlence Mohsovy stupnice pro zkoušení minerálů. V této stupnici je seřazeno 10 nerostů, z nichž každý následující je schopen vyryt do všech předcházejících vryp. [3]

Princip zkoušky spočívá ve srovnávání tvrdosti zkoušeného materiálu s tvrdostí minerálů, kterými se postupně provádí pokus o vryp do materiálu zkoušeného.

Tato zkouška je pro svoji nepřesnost u kovů užívána jen výjimečně. V technických oborech se uplatňuje při posuzování tvrdých a křehkých izolantů. [16]

Tab. 1. Sestavení nerostů dle Mohsovy stupnice

1. Mastek	6. Živec	Pořadí materiálů používaného ve strojírenství <i>Grafit</i> 0,5; <i>cín</i> 1,5; <i>olovo</i> 1,5; <i>hliník</i> 2; <i>zlato</i> 2,5; <i>stříbro</i> 2,5; <i>antimon</i> 3,5; <i>čisté železo</i> 4,5; <i>platina</i> 4,5; <i>měkká ocel</i> 5; <i>iridium</i> 6; <i>tvrdá ocel</i> 8,5; <i>nitridovaný povrch</i> 9; <i>slinuté karbidy</i> 9,8
2. Sůl kamenná	7. Křemen	
3. Vápenec	8. Topas	
4. Kazivec	9. Korund	
5. Apatit	10. Diamant	

Citlivost této stupnice je však velmi malá, proto se u kovů a jejich slitin určuje tvrdost na základě šířky vytvořeného vrypu. [3]

2.3.2 Zkouška tvrdosti podle Martense

Vrypová zkouška, která se zjišťuje přitlačováním kuželového diamantového hrotu, o vrcholovém úhlu 90° , měnitelným tlakem na leštěný povrch zkušebního předmětu, který se pohybuje danou rychlostí. Mírou tvrdosti je pak síla F , potřebná ke vzniku vrypu širokého 0,01 mm. [17]

2.3.3 Zkouška tvrdosti podle Stocka

Zkouška je obdobou Martensovi zkoušky. Zatížení je však stálé a měřítkem tvrdosti je převrácená hodnota šířky vrypu udané v mm. Převrácené hodnoty naměřeného výsledku je užito proto, aby větší tvrdosti odpovídalo větší číslo. Kdyby byla jako míra tvrdosti uvedena přímo šířka vrypu, příslušelo by tvrdším materiálům menší číselné vyjádření než materiálům měkčím. [16]

3 ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI

Podle normy ISO 14577 jsou statistické zkoušky tvrdosti rozděleny dle velikosti síly, působící na indentor během indentace do tří skupin:

- 1) Zkoušky makrotvrdosti – $2 \text{ N} < F < 30 \text{ kN}$
- 2) Zkoušky mikrotvrdosti – $2 \text{ N} > F, h > 200 \text{ nN}$
- 3) Zkoušky nanotvrdosti – $h < 200 \text{ nN}$ [6]

3.1 Mikrotvrdost podle Vickerse

Podstata, princip a průběh zkoušek tvrdosti a mikrotvrdosti se od sebe vzájemně téměř neliší. Hlavní a podstatný rozdíl mezi zkouškami je ve velikosti zatížení, kterým působíme na indentor. Zkoušku tvrdosti a mikrotvrdosti dle Vickerse se řídí evropskou normou ČSN EN ISO 14577-1 pro tři různé oblasti zatížení (viz. Tab. 2). [6]

Tab. 2. Tvrdost dle Vickerse – tři oblasti zatížení [4]:

Označení	Hodnota tvrdosti HV	Zkušební zatížení [N]
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	$\geq \text{HV } 5$	$F \leq 49,03$
Zkouška tvrdosti podle Vickerse s nízkým zatížením	$\text{HV } 0,2 - \text{HV } 5$	$1,961 \leq F \leq 49,03$
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	$\text{HV } 0,01 - \text{HV } 0,2$	$0,09807 \leq F \leq 1,961$

Zkouška se provádí obvykle při teplotě 10 až 35°C, v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Po celou dobu zkoušky musí být zkušební přístroj chráněn proti rázům a chvění. Zkušební zatížení se používají dle Tab. 2. Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce a je důležité, aby se během zkoušky nepohnulo. Plochy v místě styku musí být čisté a bez cizích tělísek. Vnikající těleso se vtlačuje do zkušební vzorku zatížením směřujícím kolmo k povrchu, bez rázu a bez chvění. Doba, po kterou zatěžujeme zkušební sílou, nesmí být menší než 2s a delší než 8s a zároveň nesmí rychlost zatěžování překročit 0,2mm/s. [8]

Tab. 3 Zkušební zatížení pro mikrotvrdot podle Vickerse [4]:

Tvrdot HV	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
0,01	0,09807
0,015	0,1471
0,02	0,1961
0,025	0,2942
0,05	0,4903
0,1	0,9807

3.2 Mikrotvrdot podle Knoop

Knoopův indentor se používá pro zjištění tvrdosti mimořádně tvrdých a křehkých materiálů, protože na rozdíl od Vickerse je délka hlavní úhlopříčky snadněji měřitelná.

Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce, aby se během zkoušky nepohnulo. Indentor se zatlačuje do zkušebního tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k povrchu. Doba od začátku zatěžování nesmí překročit 10s. Rychlost přibližování vnikajícího tělesa musí být v rozmezí 15 μ m/s - 70 μ m. [6]

Tab. 4. Zkušební zatížení pro mikrotvrdot podle Knoop [4]:

Tvrdot HK	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
0,01	0,09807
0,02	0,1961
0,025	0,2452
0,05	0,4903
0,1	0,9807
0,2	1,961
0,3	2,942
0,5	4,903
1	9,807

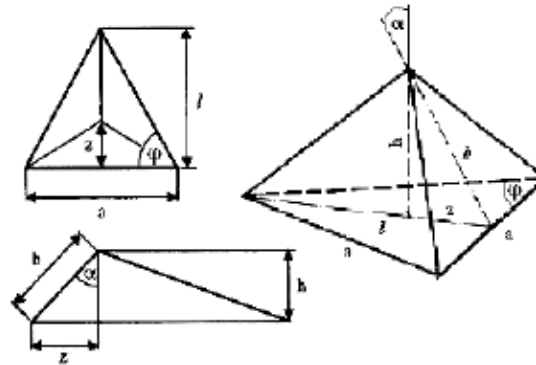
3.3 Mikrotvrdot podle Berkovice

Princip a průběh zkoušky je stejný s Vickersovou zkouškou. Rozdíl je pouze ve vnikajícím tělese. Výroba pravidelného čtyřbokého jehlanu je náročná, především v dodržení sbíhavosti hran. Indentor pro Berkovicovu zkoušku představuje nepravidelný trojboký diamantový jehlan. Původní Berkovicův indentor měl úhel mezi výškou a bočními stěnami 65,03°. Dnes se užívá modifikovaného Berkovicova indentoru, který má úhel 65,27°.

Vztah pro výpočet tvrdosti dle Berkovice:

$$H_{ch} = \frac{W}{v^2} \quad (9)$$

kde H_{ch} je mikrotvrdost podle Berkoviche, W zkušební zatížení [N] a v výška trojúhelníku změřená na vtisku [mm]



Obr. 11. Berkovicův indentor [8]

4 MODIFIKACE POLYMERŮ

Modifikace polymerů je velmi široký pojem, zahrnující mnoho způsobů fyzikálních a chemických přeměn polymerů. Jedná se o úmyslnou přeměnu polymerů prováděnou za účelem získání polymerního materiálu s odlišnými vlastnostmi. Vzhledem ke zvyšujícím se nárokům na vlastnosti a stále se rozšiřující oblast použití polymerů význam modifikace polymerů neustále vzrůstá.

K získání modifikovaných polymerů se používá těchto základních způsobů:

- **fyzikální modifikace** mechanickým smíšením dvou nebo více polymerů
- **mechanochemické modifikace**, při níž mechanickou cestou vzniknou reaktivní úseky polymerních řetězců, které se buď navzájem propojí, nebo zreagují s přítomným monomerem schopným polymerace
- **chemické modifikace** na základě chemických reakcí účinných látek s reaktivními skupinami polymerních řetězců [18]

4.1 Fyzikální modifikace

Fyzikální modifikace nabývá stále širšího uplatnění. Mechanické sloučení dvou a více polymerů se mnohdy získá směs s vynikajícími vlastnosti. Například u houževnatého polystyrenu se velmi často jako modifikující složka používá butadien styrenový kaučuk. Přídavek polyvinylchloridu k chloroprenovému kaučuku zase zlevní výslednou pryž při zachování její odolnosti. [18]

4.2 Mechanochemická modifikace

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

- mechanické degradace směsi polymerů
- mechanické degradace polymeru v přítomnosti monomeru

U mechanické degradace vznikají modifikované polymery kombinací makroradikálů s mechanicky aktivovanými polymerními řetězci. U mechanické degradace v přítomnosti monomeru vznikající makroradikály iniciují polymeraci přítomného monomeru. V obou případech probíhá současně řada reakcí, které vedou kromě jiného i ke vzniku roubova-

ných nebo blokových kopolymerů, které se liší strukturou a délkou bloků. Výsledný produkt není ze strukturního hlediska jednotný ani definovatelný. Pro tento druh kopolymeru, obsahujícího různých struktur s homopolymery, se užívá termín *interpolymery*. [18]

4.3 Chemická modifikace

Chemická modifikace polymerů představuje úmyslnou přeměnu chemické struktury působením chemických látek nebo reakčních podmínek. Z hlediska délky makromolekulárních řetězců (střední molekulové hmotnosti) lze chemické reakce polymerů rozdělit na:

- reakce probíhající prakticky při zachování střední molekulové hmotnosti polymeru, které nazýváme polymer analogické přeměny
- reakce vedoucí ke změnám střední molekulové hmotnosti polymeru, k nimž patří reakce probíhající při mechanochemické modifikaci a reakce probíhající síťováním polymerů

Polymer analogické přeměny probíhají nejlépe v roztoku nebo v nabobtnaném polymeru. Rozpouštědlo umožňuje snadnější vzájemný styk reagujících látek. U nerozpustných a nebobtnajících polymerů usnadňuje reakci jejich rozmělnění na malé částičky. Je pochopitelně důležitý stupeň rozmělnění, charakter povrchu částic, množství a charakter pórů v částici polymeru. Aby nedocházelo k rozrušování makromolekulárních řetězců oxidačním štěpením, je lepší provádět tyto reakce v dusíkové atmosféře.

Síťováním ztrácejí polymery rozpustnost, tavitelnost a termoplasticitu, ale získávají tvarovou stálost za zvýšených teplot, někdy i vyšší odolnost vůči chemikáliím. Čím hustěji je polymer zesíťován, tím obtížněji do něj vnikají nízkomolekulární látky – klesá bobtnavost a navlhavost.

Ke vzniku prostorové sítě může dojít různými způsoby:

- polykondenzací nebo polyadící tří a více funkčních monomerů
- polykondenzací monomerů, z nichž má aspoň jeden vyšší funkčnost než 2
- zabudováním příčných vazeb mezi lineární nebo rozvětvené řetězce
- vzájemnou reakci řetězců s vhodnými reaktivními skupinami [18]

5 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ

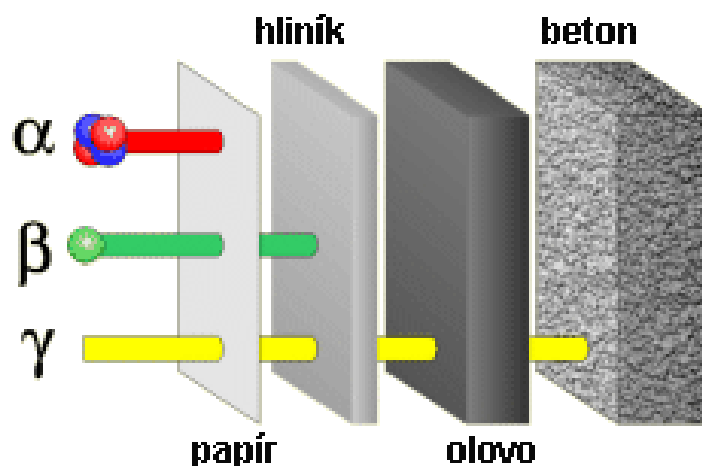
Ionizující záření je schopné při průchodu prostředím způsobit jeho ionizaci. Vytvoří z elektricky neutrálních atomů kladné a záporné ionty (iontové páry). S ohledem na charakter ionizačního procesu lze ionizující záření rozdělit na přímo ionizující a nepřímo ionizující.

Přímo ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi (protony, elektrony, pozitrony, částicemi alfa, beta apod.), které mají dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby mohli vyvolat ionizaci. Nepřímo ionizující záření zahrnuje nenabitě částice (fotony, neutrony, apod.), které sami prostředí neionizují, ale při interakcích s prostředím umožňují sekundární, přímo ionizující nabitě částice. Ionizace prostředí je pak způsobena těmito sekundárními částicemi.

Zdroje ionizujícího záření mohou být radionuklidy nebo generátory. Radionuklidy mají nestabilní atomová jádra, rozpadají se a emitují ionizující záření. [19]

Druhy Ionizačních záření:

- *záření alfa* – proud α -částic (jáher helia)
- *záření beta* – záření urychlených elektronů nebo pozitronů
- *záření gama* – energetické fotony (druh elektromagnetického záření)
- *neutronové záření*

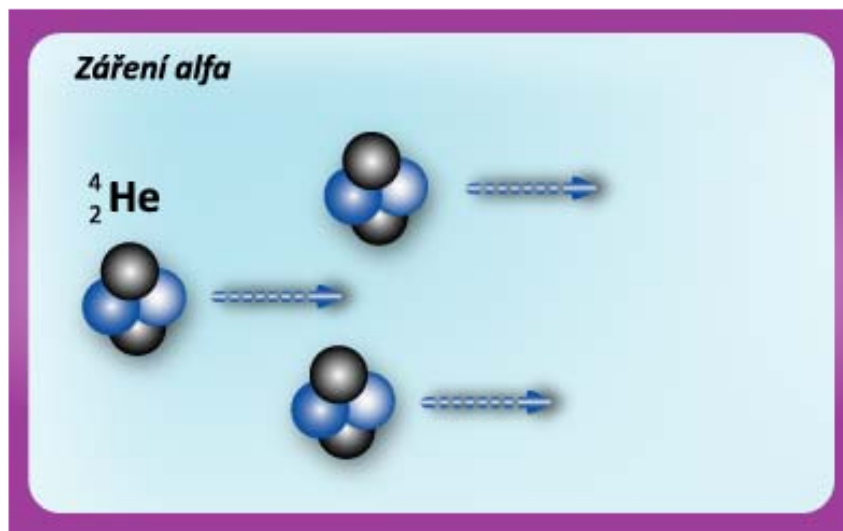


Obr. 12. Pronikavost jednotlivých druhů ionizujících záření [20]

5.1 Záření alfa

Záření α se skládá ze dvou protonů a dvou neutronů, jde tedy o jádro helia. Protože tyto čtyři nukleony mají velkou vazebnou energii, chová se jejich seskupení jako jedna částice.

Záření α se dále také označuje jako H^{2+} .



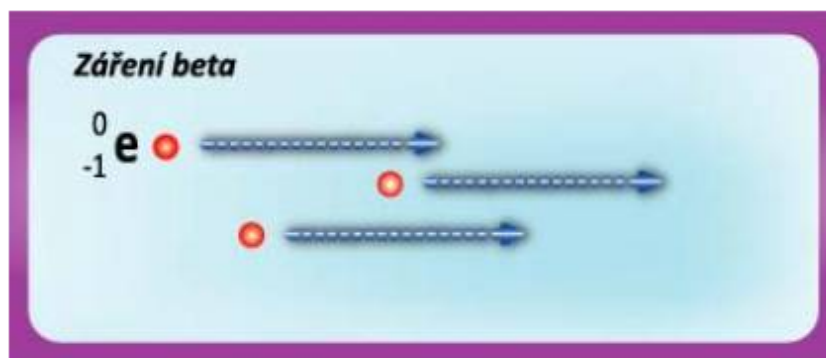
Obr. 13. Záření α

Protože hmotnost částice α je velká a že nese poměrně velký elektrický náboj (dva kladné elementární náboje), jsou ionizační ztráty energie této částice při průchodu absorbujičím prostředím velké. Částice α mají vysokou specifickou lineární ionizaci (vznikají řádově desítky tisíc iontů na dráze 1 cm, takže dráha je souvislou stopou). Protože ionizační ztráty jsou velké, dolet částic α je velmi malý; ve vzduchu při energiích kolem 10 MeV se pohybuje přibližně kolem 10 cm. Téměř polovina energetických ztrát ionizující α částice připadá na ionizaci a polovina na excitaci atomů prostředí. Další interakce záření α , což jsou pružné a nepružné srážky, jsou prakticky zanedbatelné.

Vzhledem k velikosti částic alfa záření jde o nejslabší druh jaderného záření, který může být odstíněn i listem papíru. Při dopadu na kůži se záření α absorbuje již v horních vrstvách epidermis. Z tohoto důvodu není záření α při vnějším ozáření (s výjimkou oka) nebezpečné. Při vnitřní kontaminaci se však energie částic α absorbuje v malém objemu tkáně, a proto působí biologicky negativně. [20]

5.2 Záření beta

Záření β je tvořeno rychlými elektrony nebo pozitrony se značným rozsahem energií. Elektrony jsou z jádra emitovány při samovolné přeměně jaderného neutronu na proton, elektron a antineutrino.



Obr. 14. Záření β

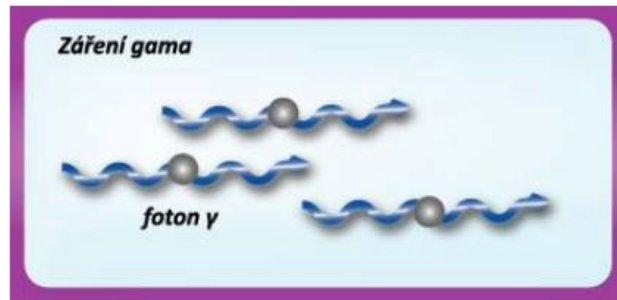
Záření β má spojité energetické spektrum, tedy obsahuje částice s nulovou energií až po částice s maximální energií, která je pro daný radionuklid charakteristická. Hodnoty částic s maximální energie u běžně používaných β zářičů činí desítky keV až jednotky MeV.

Největší energetické ztráty elektronu při jeho průchodu absorbující hmotou připadají na ionizaci a excitaci. Oproti záření α mají elektrony menší hmotnost a menší náboj, proto je jejich specifická lineární ionizace mnohem menší a tím je jejich dolet větší. Uplatňuje se též mnohem více pružný rozptyl elektronů a tvorba tzv. brzděného záření.

Beta částice jsou velmi malé a lehké (ve srovnání s částicemi α), proto jsou při průchodu hmotným prostředím velmi často rozptylovány s malými ztrátami energie a jejich dráha může tedy být značně klikatá. Pokud je absorbující prostředí složeno z lehkých prvků, nezávisí dolet záření beta prakticky vůbec na konkrétním chemickém složení prostředí. [20]

5.3 Záření gama

Záření γ je elektromagnetické záření (fotony) s velmi krátkou vlnovou délkou řádu 10^{-11} až 10^{-13} m. Vzniká při jaderných reakcích nebo radioaktivní přeměně přechodem jádra z vyššího do nižšího energetického stavu, přičemž se jádro zbavuje své excitační energie.

Obr. 15. Záření γ

Energie fotonů gama záření je dána vztahem:

$$E = p \frac{c}{\lambda} \quad (10)$$

kde p je Planckova konstanta $6,64 \cdot 10^{-34}$ J.s, c je rychlost elektromagnetického záření ve vakuu $3 \cdot 10^8$ m/s, λ je vlnová délka záření.

Záření gama má čárové spektrum. To znamená, že daný radionuklid emituje pouze fotony s určitými energiemi, které jsou pro přeměnu charakteristické. U prakticky používaných zdrojů záření gama činí jeho energie desítky keV až jednotky MeV.

Interakce gama záření s hmotným prostředím se výrazně odlišuje od interakce elektricky nabitých částic. Při průchodu prostředím uvolňují fotony elektricky nabitě částice a předávají jim energii dodatečnou k tomu, aby byly schopné prostředí ionizovat a excitovat. Zářetí γ interaguje s prostředím nepřímo, pomocí fotoelektrického jevu, Comptonova rozptylu a tvorby elektron-pozitronových párů. [20]

5.4 Neutronové záření

Neutrony jsou elementární částice bez elektrického náboje (zhruba o stejné hmotnosti jako protony), které vznikají při jaderných reakcích a spontánním štěpením atomů. Důležitou charakteristikou neutronů, která určuje jejich chování, je energie.

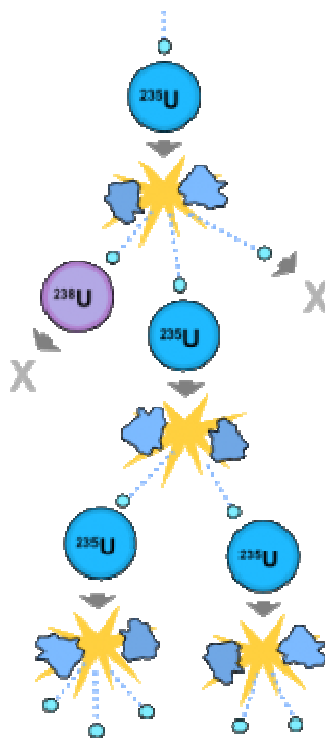
Interakce neutronů s látkou se podstatně liší od interakcí nabitých částic a γ záření. Protože neutrony nemají elektrický náboj, neuplatňují se při interakcích síly elektrické, ale jaderné.

S neutrony reagují v podstatě veškeré stabilní nuklidy. Jsou to nejhorší procesy jaderných reakcí, protože neutron nemusí překonávat potenciálovou bariéru terčového jádra, takže do něho snadno proniká, a vzniká tak složené jádro.

Tab. 5. Označení neutronů podle energie

Název		Energie
chladné	pomalé	< 0,002 eV
tepelné		0,002 - 0,5 eV
rezonanční		0,5 - 1000 eV
středních energií		1 - 500 keV
rychlé		0,5 - 10 MeV
vysokých energií		10 - 50 MeV
velmi vysokých energií		> 50 MeV

Složené jádro se může také rozštěpit za vzniku dvou jader. Takový proces nazýváme štěpnou reakcí.



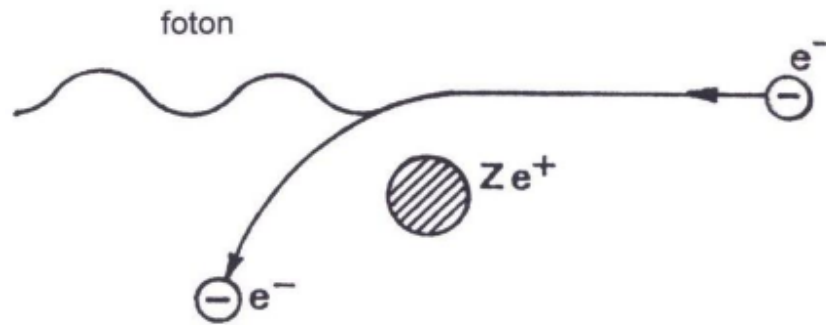
Obr. 16. Schematické znázornění štěpné reakce [20]

5.5 Rentgenové záření

Rentgenové záření je elektromagnetické záření o krátkých vlnových délkách v intervalu 10^{-9} až 10^{-13} m. Vzniká v rentgenkách zabrzděním rychle letících elektronů v těžkých kovech.

Rozlišujeme 2 druhy rentgenového záření:

- brzdné (vzniká náhlou změnou rychlosti pohybujícího se elektronu)
- charakteristické (vzniká při dopadu elektronů s vysokou energií na anodu)



Obr. 17. Schéma vzniku brzdného záření [20]

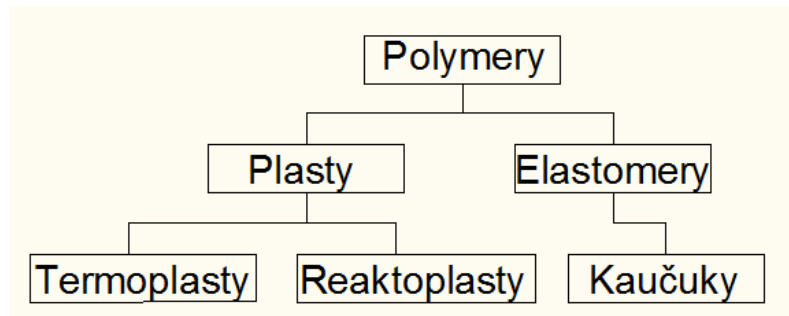
6 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky, v jejichž makromolekule se jako článek v řetězu mnohonásobně opakuje základní monomerní jednotka. Představují tedy chemickou stavebnici, která umožňuje neobyčejnou proměnlivost struktur i vlastností výsledných látek.

Syntetické polymery vyvinuté v první polovině 20. století umožnily rozvoj plastikářského průmyslu, gumárenství, výroby syntetických vláken, průmyslu folií a obalů, průmyslu nátěrových hmot a kompozitních materiálů, které ovlivnily vývoj od letectví až po sportovní výzbroj. Tyto materiály a průmyslové oblasti jsou neodmyslitelně spojeny se světovým hospodářstvím konce 20. století. Kdyby náhle nějakým nařízením nebo kouzlem polymery zmizely ze světa, okamžitě by se zhroutila i současná technická civilizace. [21]

6.1 Rozdělení polymerů

Polymery jsou chemické látky, které vykazují díky svým obrovským molekulám neobvykle širokou škálu vlastností.



Obr. 18. Základní rozdělení polymerů

Plasty jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, ale i křehké. Při zvýšené teplotě jsou plastické a tvarovatelné. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu opakovaně vratná, nazýváme tyto polymery termoplasty. Pokud jde o změnu nevratnou, neopakovanou, trvalou, mluvíme o reaktoplastech (termosety, pryskyřice), protože probíhá chemická reakce mezi molekulami většinou za zvýšené teploty.

Elastomer je vysoce elastický polymer, který lze za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. Tato deformace je převážně vratná. Hlavní skupinou elastomerů jsou kaučuky, ze kterých se vyrábí pryže. [21]

6.1.1 Termoplasty

Termoplast je plast, který je od určité teploty plastický, tvárný nebo až tekutý a po ochlazení se stane pevným, přičemž změny tvárnosti mohou nastávat opakovaně.

Termoplasty jsou polymery složené z lineárních makromolekul s dlouhým řetězcem. Řetězce jsou drženy u sebe pouze mezimolekulárními interakcemi (van der Waalsovými silami, vodíkovými můstky, interakcemi dipól-dipól). Pokud termoplast zahřejeme, tyto interakce slábnou a polymer měkne. Termoplasty jsou v širokém rozsahu teplot viskózní kapaliny. Přesnou teplotu tání nelze určit, protože se polymer skládá z makromolekul různé délky. Teplotní rozsah tání běžných termoplastů se pohybuje mezi 100 °C a 130 °C. Díky tomu patří termoplasty k dobře zpracovatelným materiálům, protože je lze snadno odlévat nebo lisovat. Příklady běžných termoplastů jsou polyetylen, polystyren, polyester, polypropylen, polymethylmethakrylát (plexisklo), polyvinylchlorid (PVC) nebo polyamidy (např. nylon, silon). [22]

6.1.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou zesíťované polymery, které vytvářejí prostorovou trojrozměrnou síť. Zesíťování nastává až při tváření plastu vlivem tepla a tlaku, někdy působením katalyzátorů. Jakmile je zesíťování dokončeno, není další tváření možné, protože opětovným dodáváním tepelné energie není možno hmotu roztavit. Husté příčné zesíťování se nazývá vytvrzování. [23]

6.1.3 Elastomery (kaučuk)

Kaučuk je polymerní materiál přírodního nebo syntetického původu, vyznačující se velkou pružností, tedy schopností se účinkem vnější síly výrazně deformovat a poté opět zaujmout původní tvar. Je to tedy tzv. elastomer. Kaučuky jsou základní surovinou pro výrobu pryží, nesprávně označovaných i jako guma. Pryž vzniká z kaučuku vulkanizací, což je teplem nebo katalyzátory (urychlovači) podporovaná reakce vulkanizačního činidla. Ta vede ke vzniku disulfidických můstků mezi makromolekulami kaučuku a k tvorbě řídké trojrozměrné polymerní sítě. Čím déle vulkanizace probíhá, tím více můstků vzniká a tím je výsledná pryž tvrdší. Vulkanizací se obvykle zásadně zlepšují vlastnosti kaučuků, např. pevnost v tahu, vratnost deformace, strukturální pevnost, odolnost k oděru, rozpustnost apod. [24]

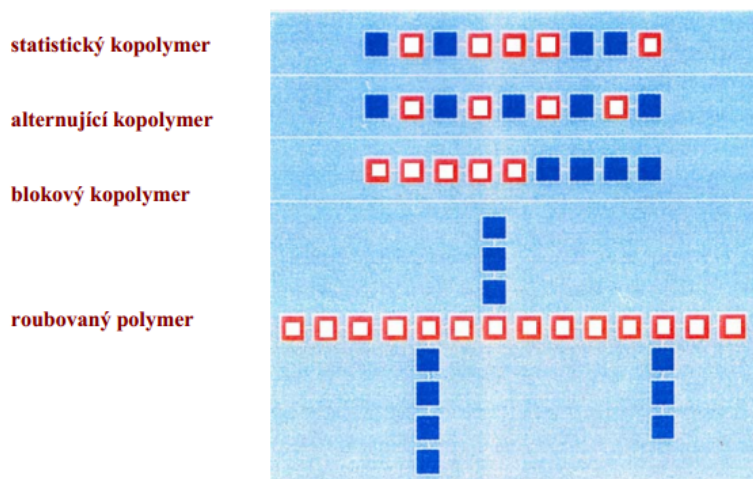
6.2 Syntéza polymerů

Syntetické polymery vznikají třemi základními chemickými reakcemi: polymerací, polykondenzací a polyadící.

6.2.1 Polymerace

Polymerace je řetězová chemická reakce velkého počtu molekul monomeru, při níž vznikají dlouhé makromolekuly polymeru. Produktem polymerace je makromolekulární řetězec, který narůstá do své „nekonečné“ délky ve velmi krátké době, takže v reakční směsi existují vedle sebe nezreagované molekuly monomeru a makromolekuly polymeru ve své konečné velikosti. Podle charakteru růstového místa lze základní polymerační reakce rozdělit na:

- Radikálovou polymeraci
- Iontovou polymeraci
 - Kationtová polymerace
 - Aniontová polymerace
 - Kopolymerace



Obr. 19. Některé struktury kopolymerů [21]

6.2.2 Polykondenzace

Polykondenzace je reakce, při níž reagují dva stejné nebo různé monomery, které obsahují dvě nebo více reakčních funkčních skupin a dochází k postupnému nárůstu molekulové hmotnosti. V průběhu reakce nevzniká pouze polymer, ale i nízkomolekulární produkt (např. voda, methanol, amoniak). [21]

6.2.3 Polyadice

Sloučeniny, jejichž molekuly obsahují násobné vazby nebo jsou tvořeny kruhy s malým počtem členů, mohou být mimo vzájemné spojování (řetězení) schopny adičních reakcí se sloučeninami, jejichž molekuly obsahují vhodné funkční skupiny. Mají-li tyto sloučeniny ve svých molekulách alespoň dvě funkční skupiny, může mnohonásobnou adicí vzniknout polymer. Tato reakce se nazývá polyadice. Na rozdíl od polymerace poskytuje polyadice strukturu základního článku polymeru odlišnou od struktury výchozích látek. [21]

6.3 Základní způsoby výroby polymerů

Při výrobě polymerů z monomerů dochází k exotermní chemické reakci. Základním problémem při těchto reakcích je odvod uvolňovaného tepla z reakční směsi. Průmyslově se polymery vyrábějí několika základními způsoby. Chemicky nejjednodušší je polymerace samotného monomeru. Pokud je polymer v monomeru rozpustný, vzniká v průběhu polymerace stále viskóznější roztok, který nakonec ztuhne na blok, který zaujímá tvar reakční nádoby (*bloková polymerace*). Nerozpouští-li se vznikající polymer ve výchozím monomeru, vylučuje se v jemných částicích. Po přidání vhodného rozpouštědla vznikne roztok polymeru (*roztoková polymerace*). Častější než polymerace samotného monomeru v bloku nebo jeho roztoku se pro technologické výhody provádí polymerace v emulzi (*emulzní polymerace*) nebo v suspenzi (*suspenzní polymerace*). [21]

6.3.1 Bloková polymerace

Blokovou polymerací se provádí iontová a radikálová polymerace. Technologickou nevýhodou polymerace v bloku je nesnadný odvod tepla. Polymerace je obecně doprovázena zmenšováním objemu. Kvůli snadnějšímu chlazení a potlačení smršťování se v bloku polymerují výrobky, které mají jeden rozměr velmi malý, např. desky z PMMA. Hlavní předností blokové polymerace je to, že lze připravit polymer o vysoké čistotě, např. PMMA a PS v čistotě vhodné pro elektroniku. [21]

6.3.2 Roztoková polymerace

Při roztokové polymeraci se reakční teplo odvádí snadněji než při blokové. Díky tomu, že rozpouštědlo je přenašečem, výsledný produkt má vždy nižší molekulovou hmotnost než při blokové polymeraci. Jestliže je polymer v rozpouštědle rozpustný, připraví se produkt,

který se používá přímo, např. jako lepidlo nebo s přidavkem dalších aditiv jako nátěrová hmota. [21]

6.3.3 Emulzní polymerace

Emulzní polymerace je proces, kdy polymer vzniká rovněž z částic mechanicky rozptýlených ve vodě, která obsahuje emulgátor (např. mýdlo) a iniciátor. Od suspenzní polymerace se liší tím, že každá částice monomeru je chráněná obalem emulgátoru a při polymeraci se mění na „jedinou“ makromolekulu polymeru. Tím je zaručena možnost jejího růstu do vysoké molekulové hmotnosti. Stejně jako u suspenzní polymerace je u emulzní zaručen velmi dobrý odvod tepla, ale produkt je znečištěn aditivou. Emulzně se polymerují zejména homo- a kopolymery butadienu, polyvinylacetát a PVC. [21]

6.3.4 Suspenzní polymerace

Při suspenzní polymeraci je zaručen dobrý odvod reakčního tepla. Monomer s iniciátorem je rozptýlen mícháním ve vodě. S postupující konverzí reakce stoupá viskozita a lepkavost částiček a nebezpečí jejich slepení ve velké shluky. Tomu se zabraňuje přidavkem látek, které snižují viskozitu nebo ulpívají na povrchu částic. Suspenzní polymer je kvalitativně stejnoměrnější než blokový, ale obsahuje více příměsí. Tímto způsobem se vyrábí např. PS a PVC. [21]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 STANOVENÍ CÍLU DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo měření mikrotvrlosti povrchové vrstvy polypropylenu, modifikovaného beta zářením. Síťovací činidlo TAIC (ve formě granulí) bylo implementováno do polypropylénu v množství 5 objemových procent. Celkový proces přípravy prováděla firma PTS Plastic Technologie Service, Hautschenmühle 3, Adelshofen, Deutschland.

Testovaná zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování na vstřikovacím stroji ARABURG ALLROUNDER 470C. Zkušební tělesa byla následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, a 99 kGy. Měření mikrotvrlosti proběhlo na mikrotvrdoměru Micro-Combi testeru od firmy CSM Instruments, při zatížení 0,5N, 1N a 5N. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cíle diplomové práce byly následující:

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

8 CHARAKTERISTIKA POUŽITÉHO MATERIÁLU

8.1 Polypropylen

Polypropylen (PP), jeden ze skupiny polyolefinů, je termoplastický polymer, který patří mezi nejběžněji používané plasty. Používá se v mnoha odvětvích potravinářského a textilního průmyslu a v laboratorních vybaveních. Nejčastěji se prodává pod obchodním názvem Triplen, Tatren, Mosten apod.

Polypropylen je jeden z nejmladších plastických hmot, který objevil profesor milánské polytechniky Natta v roce 1954, jemuž se podařilo polymerovat polypropylen, použitím stereospecifických katalyzátorů, na lineární polymer mimořádných vlastností.

Krystalickou strukturu polypropylenu lze významně ovlivnit při zpracování. Při velmi rychlém ochlazení taveniny je možno získat vysoce transparentní tenkostěnné výrobky (fólie). Rychlým ochlazením vznikají sférolity s velmi malými průměry a proto je rozdíl indexu lomu krystalické a amorfní fáze malý. Se zvětšujícím se průměrem sférolitů klesá rázová houževnatost a stoupá tuhost. Zvýšení transparence, houževnatosti a flexibility lze dosáhnout snížením stupně krystalinity. [25]

8.1.1 Výroba polypropylenu

Pro výrobu polymeru je výchozí surovinou nenasycený uhlovodík propylen $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$, který se polymeruje. Postup polymerizace je založen na Zieglerových-Nattových katalyzátorech, které jsou nejčastěji tvořeny kombinací triethylaluminia s chloridem titanitým.

Výrobní postup je složen z vlastní polymerace propylenu, z extrakce podílu ataktického polymeru, filtrace extrahovaného polymeru, následného odstranění zbytku katalyzátorů a sušení. Vyčištěný polymer se dále homogenizuje s přísadami (antioxidanty, stabilizátory, barviva), granuluje, balí se a expeduje.

Polymerace propylenu probíhá při nízkém tlaku v polymerátoru, za iniciačního účinku stereospecifických katalyzátorů a mírně zvýšené teplotě (50 až 100 °C) v reakčním prostředí vhodných rozpouštědel.

Stereospecifické polymerační katalyzátory je zpravidla systém dvou až tří složek, obsahující katalyzátor chlorid titanitý, aktivátor triethylaluminium a někdy ještě vhodnou přísadu ovlivňující řetězení a molekulovou hmotnost polymeru. Tyto složky jsou suspenzovány nebo rozpuštěny ve vhodném rozpouštědle. Katalyzátor i rozpouštědlo ovlivňují výtěžek

izotaktického podílu a také všechny vlastnosti polymeru. V praxi je důležité, aby podíl izotaktické složky byl minimálně 90 %, v případě vláken nejméně 95 – 97 %. [25]

8.1.2 Zpracování polypropylenu

Než se začne polymer zpracovávat, je potřeba polymer upravit přidáním vhodných světelných a tepelných stabilizátorů, které mohou být kapalné nebo práškové.

Polypropylen se dá výborně tvářet a zpracovávat jako jiné termoplastické hmoty. Pro zpracovatelský průmysl se vyrábí různé druhy propylenu pro výrobu fólií, vytlačování, vstřikování a výrobu vláken. Volba druhu materiálu závisí na technologickém procesu zpracování, a také na požadovaných vlastnostech výrobků v aplikaci. Vytlačováním na šnekových vytlačovacích strojích lze z polypropylenu vyrábět trubky, desky, fólie a různé profilové výrobky. Desky a trubky se spojují hlavně svařováním, protože lepení je obtížné. Polypropylenové fólie se dají potiskovat. Nanášením polypropylenu na kovové dílce se získávají velmi odolné ochranné povlaky proti působení chemických činidel. Vstřikováním se polypropylen zpracovává na vstřikovacích strojích, používaných pro termoplastické polymery. Vstřikování se vyrábějí tlustostěnné a velkoplošné výrobky. Vyfukováním lze vyrábět z polypropylenového předlisku na vyfukovacích automatech i dutá tělesa (láhve, sudy, kanistry). Zvlákňováním se z taveniny polypropylenu vyrábějí velmi kvalitní technická vlákna. [25]

8.1.3 Vlastnosti polypropylenu

Polypropylen je lehký polymer, který plave ve vodě, je bezbarvý, fyziologicky nezávadný a bez zápachu. Zajímavou vlastností polypropylenu je malá propustnost vzduchu, plynů a pár, a proto je vhodný pro využití v obalové technice.

Má výborné mechanické vlastnosti, tudíž velkou tvrdost, pevnost a tepelnou odolnost. Snáší i krátkodobé ohřátí na 140 °C. Za zvýšených teplot má polypropylen sklon k autooxidaci, a proto se musí stabilizovat.

Polypropylen je krystalický polymer o stupni krystalinity 60 až 75 %. Za normální teploty je nerozpustný ve většině organických rozpouštědel až při teplotě 90 °C se rozpouští v chlorovaných a aromatických uhlovodících. Vzhledem ke své krystalinicitě je polypropylen neprůhledný. Má nízkou hustotu 0,90 až 0,92 g/cm³. Bod tání je 160 až 170 °C. Nízká odolnost proti UV záření se zlepšuje přidáním stabilizátoru.

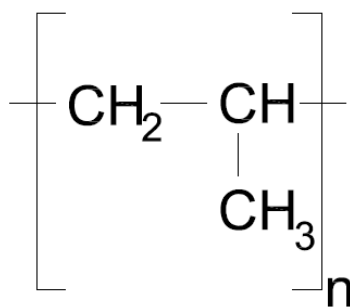
Porovnání vlastností ataktického, izotaktického a syndiotaktického polypropylenu je uvedeno v tabulce (Tab. 1.).

Vlastnosti	Ataktický	Izotaktický	Syndiotaktický
Bod tání [°C]	-	165	135
Hustota [g/cm ³]	0,85 - 0,90	0,92 - 0,94	0,8 - 0,91
Rozpustnost v uhlovodíku při 20 °C	vysoká	nerozpouští se	střední
Pevnost	velmi nízká	vysoká	střední

Tab. 6. Vlastnosti izotaktického, syndiotaktického a ataktického PP [25]

8.1.4 Molekulární struktura polypropylenu

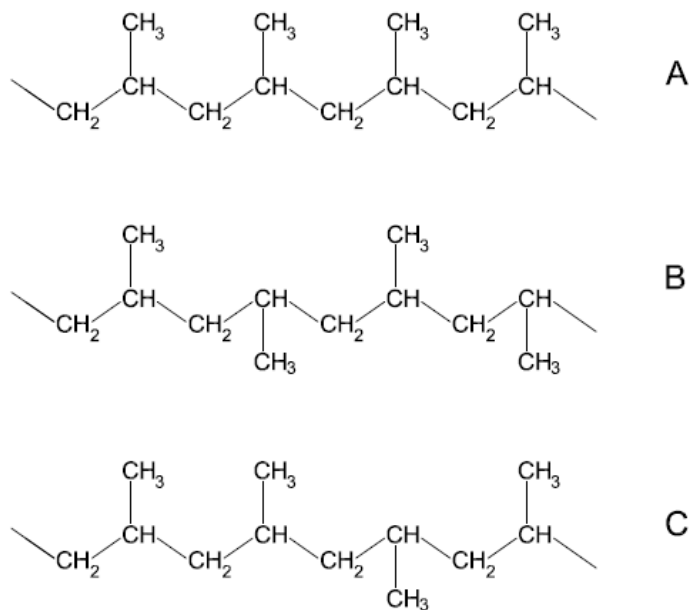
Hlavní řetězec polypropylenu je tvořen uhlíkovými atomy, přičemž na každém druhém uhlíku je vázána methylová skupina [25]:



Obr. 20. Struktura polypropylenu

Polypropylenové jednotky jsou nesymetrické, proto se mohou do makromolekuly skládat různě. Podle podmínek, za kterých polymerace probíhá, vznikají tři druhy polymeru, které profesor Natta nazval polymer [25]:

- 1) ataktický
- 2) izotaktický
- 3) syndiotaktický



Obr. 21. Stereometrie polypropylenu

- A) izotaktický
- B) syndiotaktický
- C) ataktický

Izotaktický polymer, jak je vidět na Obr. 2. A, má methylové skupiny propylenu pravidelně seřazeny vždy podél jedné strany hlavního uhlíkatého řetězce makromolekuly.

Syndiotaktický polymer, jak zobrazuje Obr. 2. B, má methylové skupiny propylenu pravidelně střídavě seřazen po obou stranách hlavního uhlíkatého řetězce makromolekuly.

Ataktický polymer, jak je patrné z Obr. 2. C, má methylové skupiny propylenu uloženy nepravidelně po obou stranách hlavního uhlíkatého řetězce makromolekuly. [25]

8.1.5 Využití polypropylenu

Pro mimořádné vlastnosti polypropylenu se uplatňuje v řadě technických aplikací a při výrobě spotřebního zboží. Vstříkované výrobky mají nejrůznější použití. Pro svou tuhost, mechanickou pevnost a dobré elektroizolační vlastnosti jsou vhodným materiálem na technické výlisky, např. v automobilovém průmyslu tvoří součásti přístrojových desek, ventilátorů, víka rozvaděče atd. Dobrá tekutost polypropylenu umožňuje výrobu technicky náročných výlisků vhodných pro elektrotechniku. Výborná tepelná odolnost proti sterilačním

teplotám je výhodná pro zdravotnické výrobky, např. injekční stříkačky, hadičky, součásti přístrojů a mísy pro nemocné. Dále se z něj vyrábějí hračky, kbelíky, součásti vysavačů, praček, ventilátorů, chladniček, sušičů na vlasy, apod.

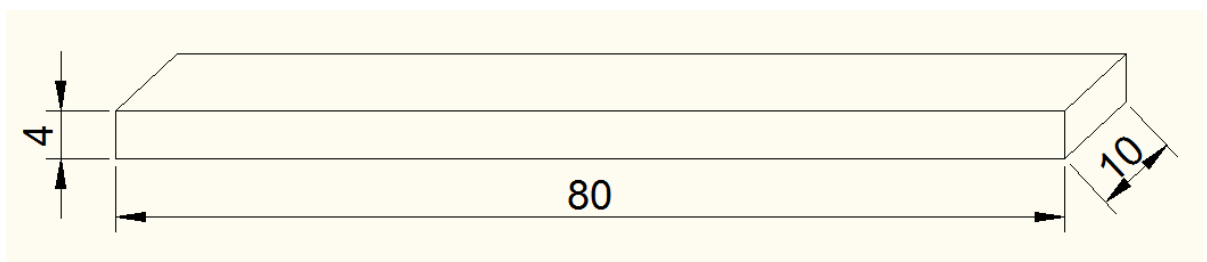
V obalové technice se používají fólie pro balení potravin a textilií. Tuhost fólie je výhodná při balení na balících automatech. Význam této fólie je jako izolační materiál v elektrotechnice. Polypropylenové desky se využívají v chemickém průmyslu k vykládání chemických zařízení. Nejvýznamnější využití polypropylenu je potrubí pro studenou i teplou vodu. Vlákná polypropylenu se uplatňují při výrobě technických tkanin pro výrobu pytlů a filtračních plachetek. Pro svou odolnost proti oděru jsou tato vlákna využívána hlavně pro výrobu kobereců. [25]

9 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Zkušební tělesa pro zkoušku mikrotvrdomosti byla vyrobena technologií vstřikování na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 470 C. Tvar a rozměry zkušebních těles byl vyroben podle normy ČSN EN ISO 527-1. Procesní podmínky pro vstřikování byly nastaveny podle doporučení výrobce materiálu.



Obr. 22. Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470 C



Obr. 23. Zkušební těleso pro zkoušku tvrdosti

10 OZAŘOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Do polypropylenu bylo přidáno síťovací činidlo TAIC triallylizocyanuran v množství 5 objemových procent. TAIC umožní při ozařování základního materiálu to, aby se volné radikály polypropylenu chemicky navázaly na dané činidlo a tím se vytvořil určitý stupeň zesíťování. Tento proces přípravy granulátu se síťovacím činidlem byl realizován ve firmě PTS Plastic Technology Service.

Následně připravená zkušební tělíska byla vystavena různým dávkám β záření, a to 33, 66 a 99 kGy.

Proces ozáření zkušebních tělísek byl uskutečněn ve firmě BGS Beta Gamma Service v Německu. Zdrojem elektronového β záření byl vysokonapěťový urychlovač typu Rhodotrons maximální energií 10 MeV.



Obr. 24. Linka na ozařování

11 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI

Instrumentovaná zkouška tvrdosti byla provedena na přístroji Micro-Combi Tester od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 14577-1.

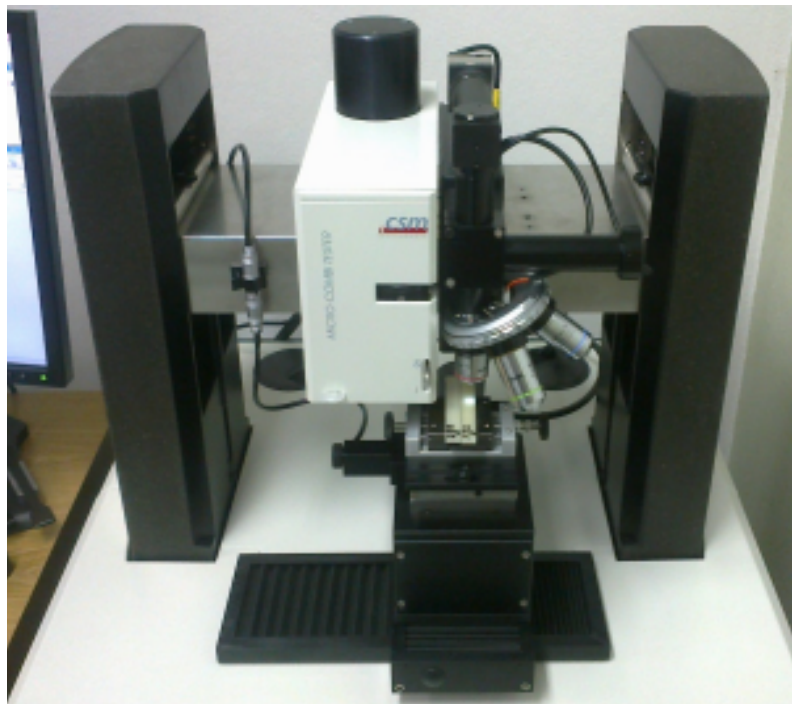
Parametry zkoušky:

- Aplikované zatížení – 0,5N, 1N a 5N
- Výdrž na maximální zatížení – 1 N/min (pro 0,5N), 2N/min (pro 1N) a 10N/min (pro 5N)
- Poissonovo číslo – 0,3

Parametry indexačního krípu (creep C_{IT}):

- Aplikované zatížení – 1N
- Výdrž na maximálním zatížení – 21600 s
- Zatěžující a odtěžující rychlost – 2N/min
- Poissonovo číslo – 0,3

Jako indentor byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° (Vickersův indentor). Měření bylo provedeno metodou DSI (Depth Sensing Indentation) a následné vyhodnocení mikromechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.



Obr. 25. Mikrotvrdoměr – Micro-Combi Tester

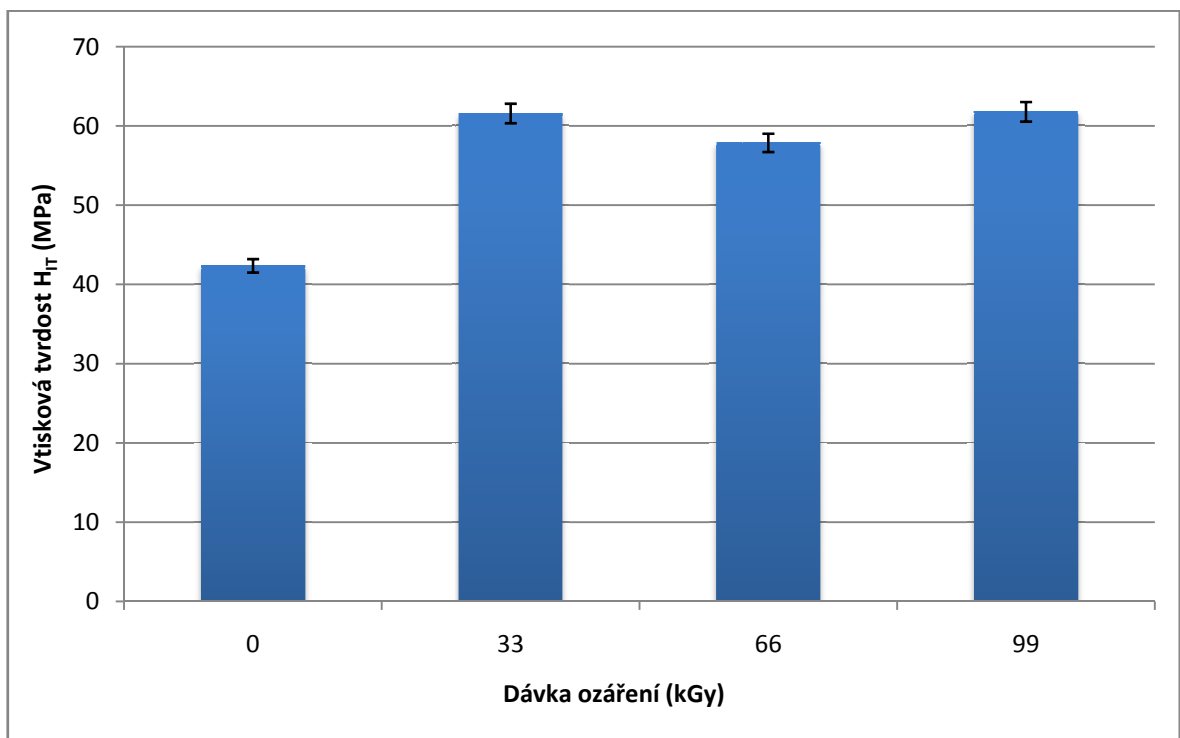
12 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno vždy na sérii 10 kusů zkušebních těles. Z výsledků měření byl zjištěn soubor výsledků, charakterizující mikromechanické vlastnosti povrchové vrstvy ozářeného a neozářeného polypropylenu. Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Při měření byly stanoveny tyto parametry:

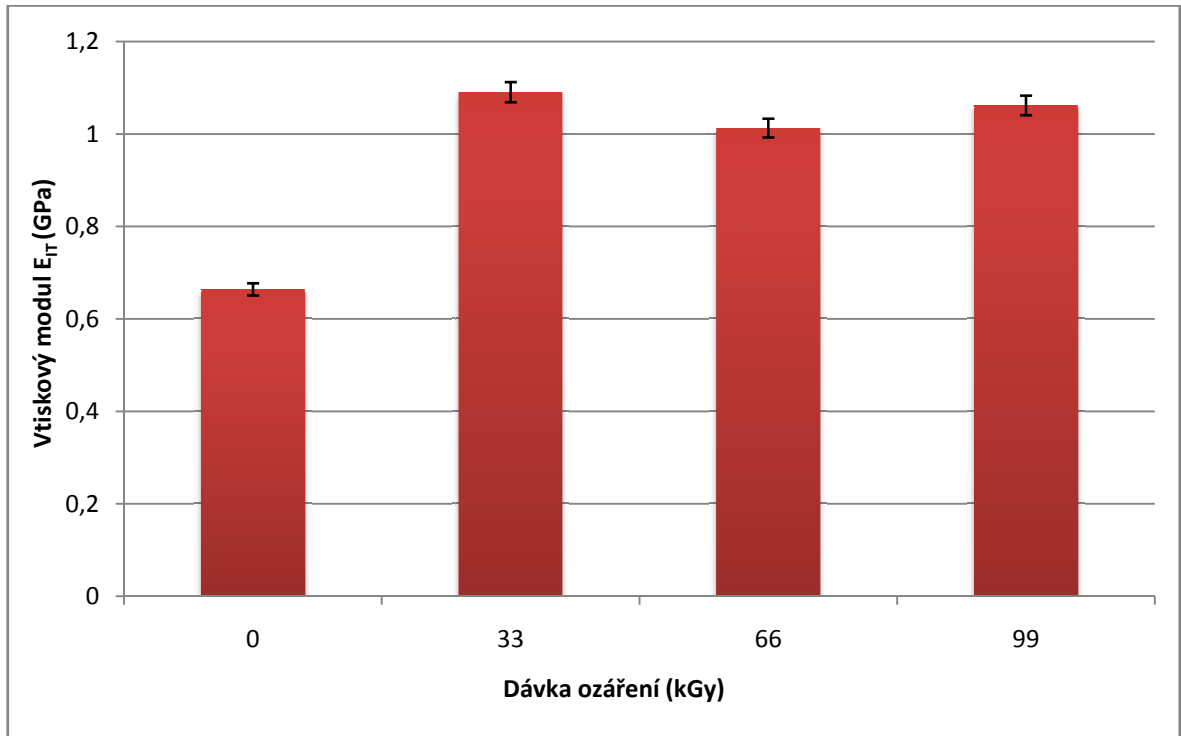
- H_{IT} – vtisková tvrdost (MPa)
- E_{IT} – vtiskový modul (GPa)
- C_{IT} – vtiskové tečení - creep (%)
- W_{el} – elastická deformační práce (μJ)
- W_{pl} – plastická deformační práce (μJ)
- n_{IT} – celková deformační práce (%)

12.1 Měření mikrotvrdomosti při zatížení 0,5 N



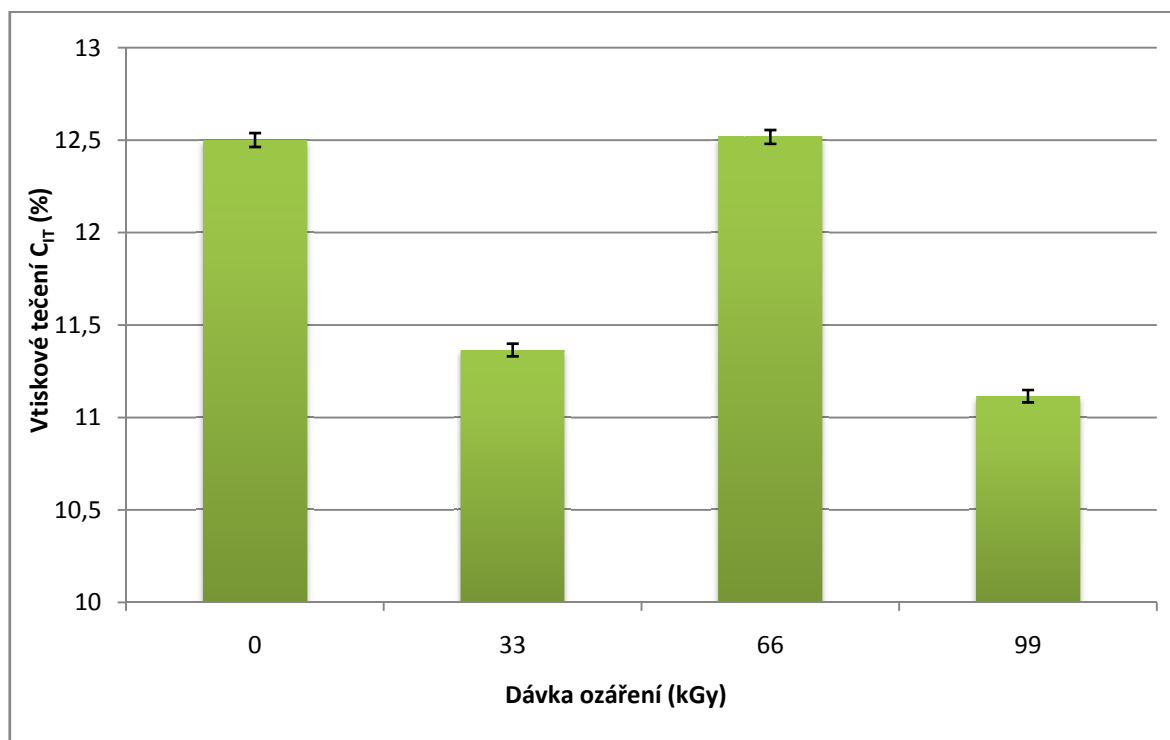
Obr. 26. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 0,5 N

Z výsledků měření mikrotvrdomosti u testovaného polypropylenu bylo zjištěno, že nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u neozářeného PP (42 MPa). Naopak nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna u PP ozářeného dávkou beta záření 99 kGy (62 MPa), jak je patrné z obrázku (Obr. 26).



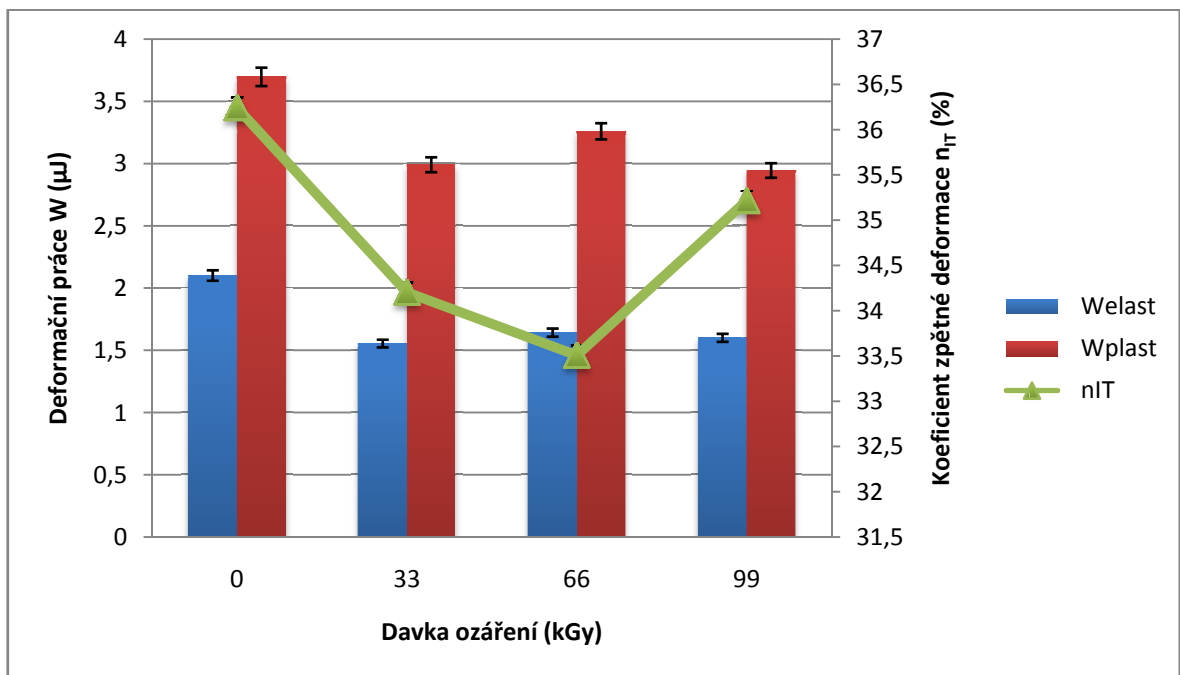
Obr. 27. Vtiskový modul E_{IT} Při zatížení 0,5 N

Zkouška mikrotvrdomosti provedená na polypropylenu modifikovaném beta záření ukázala, že nejmenší hodnota vtiskového modulu pružnosti, který charakterizuje tuhost testované povrchové vrstvy, byla zjištěna u neozářeného polypropylenu (0,66 GPa). Naopak nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti by naměřena u polypropylenu ozářeného dávkou 33 kGy (1,09 GPa), jak je patrné z obrázku (Obr. 27).



Obr. 28 Vtiskové tečení (creep) C_{II} při zatížení 0,5 N

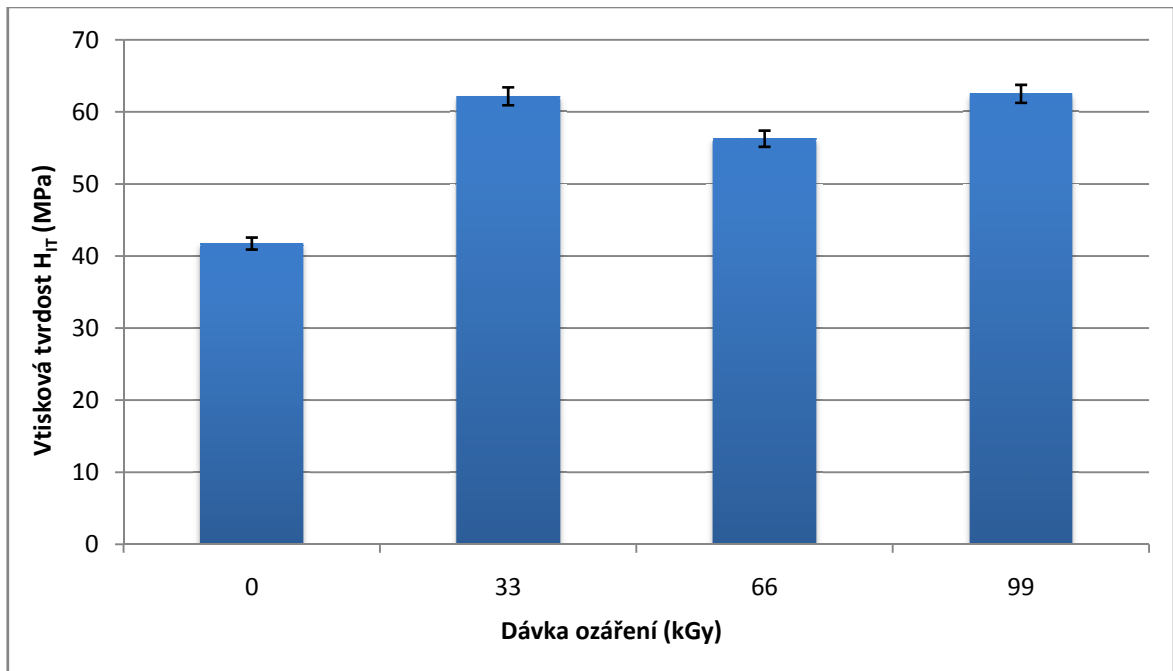
Měření mikrotvrdosti poskytlo také důležité informace o chování povrchové vrstvy při zatížení konstantní silou v průběhu času. Nejmenší hodnota vtiskového tečení (krípu) byla naměřena u PP ozářeného dávkou 99 kGy (11,1%). Naopak nejvyšší hodnota krípu, reprezentována vtiskovým tečením byla zjištěna u neozářeného PP (12,5%), jak je patrné z obrázku (Obr. 28).



Obr. 29. Deformační práce W a koeficient zpětné deformace n_{IT} při zatížení $0,5\text{ N}$

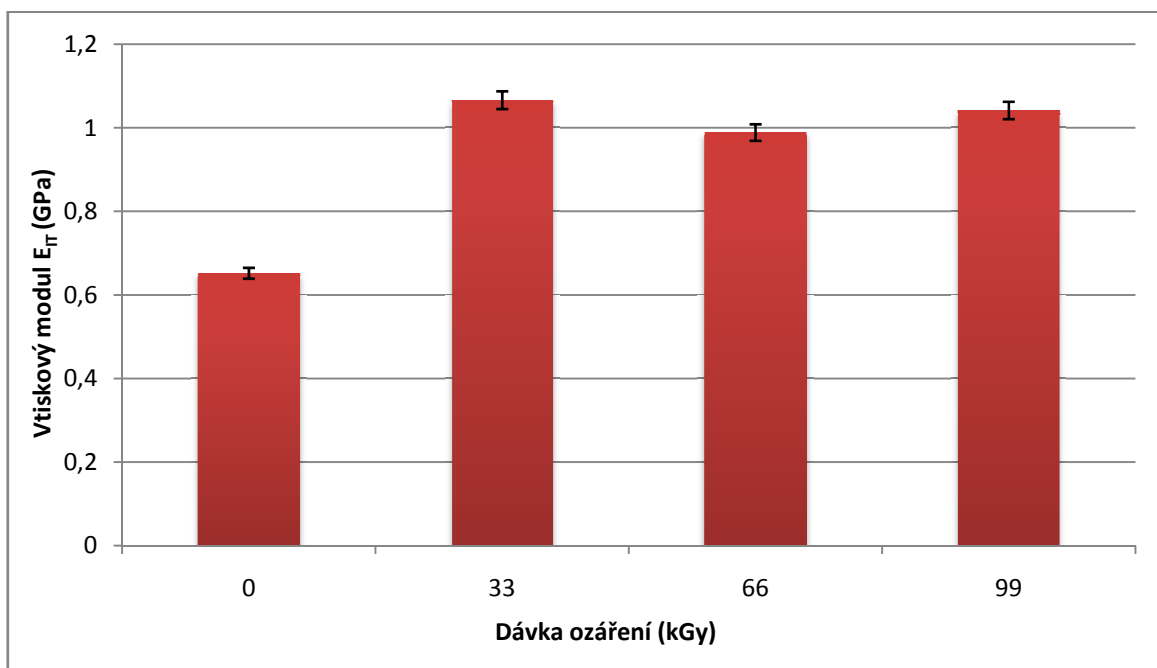
Deformační práce, která byla spotřebována při zkoušce mikrotvrlosti, je důležitou hodnotou, charakterizující chování povrchové vrstvy testovaného PP. Nejmenší hodnota elastické deformační práce byla zjištěna u PP ozářeného dávkou 33 kGy ($1,5\ \mu\text{J}$), u plastické deformační práce byla nejmenší hodnota zjištěna u PP ozářeného dávkou 99 kGy ($2,9\ \mu\text{J}$). Nejvyšší hodnoty jak elastické, tak plastické deformační práce byly naměřeny u neozářeného PP. Elastická část deformační práce (koeficient zpětní deformace), poskytuje informace o relaxaci provedeného vtisku do povrchové vrstvy testovaného PP. Z výsledků měření mikrotvrlosti bylo zjištěno, že nejmenší hodnota elastické části deformační práce byla zjištěna u PP ozářeného dávkou 66 kGy (33,5%), zatímco nejvyšší hodnota byla zjištěna u neozářeného PP, jak je patrné z obrázku (Obr. 29).

12.2 Měření mikrotvrdomosti při zatížení 1 N



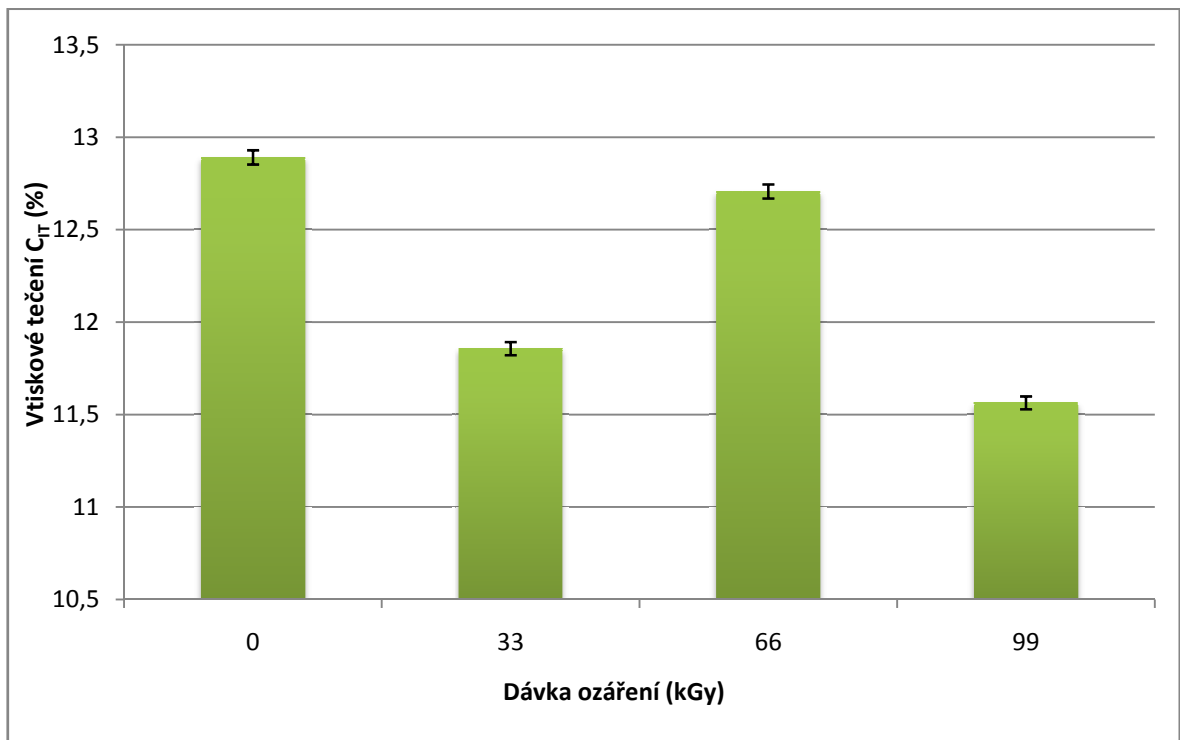
Obr. 30. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 1 N

Z naměřených výsledků mikrotvrdomosti u testovaného polypropylenu bylo zjištěno, že nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u neozářeného PP (42 MPa). Naopak nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna u PP ozářeného dávkou beta záření 99 kGy (63 MPa), jak je patrné z obrázku (Obr. 30).



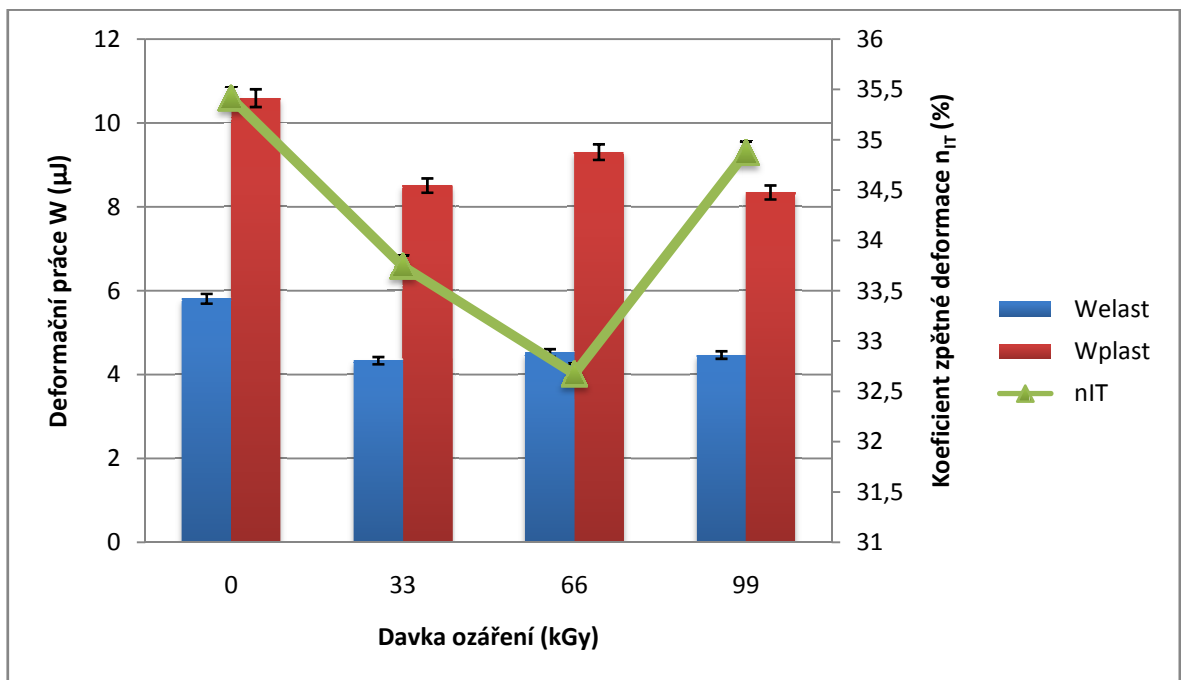
Obr. 31. Vtiskový modul E_{IT} Při zatížení 1N

Zkouška mikrotvrdomosti provedená na polypropyleny modifikovaném beta záření ukázala, že nejmenší hodnota vtiskového modulu pružnosti, který charakterizuje tuhost testované povrchové vrstvy, byla zjištěna u neozářeného polypropyleny (0,66 GPa). Naopak nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti by naměřena u polypropyleny ozářeného dávkou 33 kGy (1,07 GPa), jak je patrné z obrázku (Obr. 31).



Obr. 32. Vtiskové tečení (creep) C_{II} při zatížení 1 N

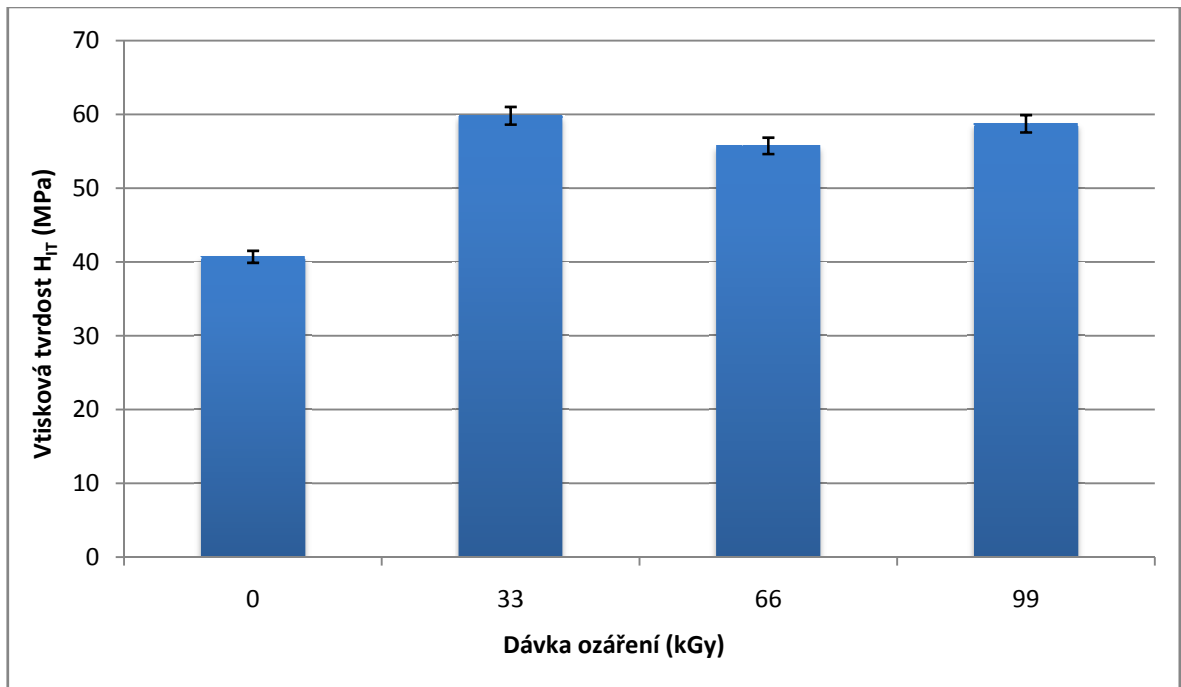
Měření mikrotvrdomosti poskytlo také důležité informace o chování povrchové vrstvy při zatížení konstantní silou v průběhu času. Nejmenší hodnota vtiskového tečení (krípu) byla naměřena u PP ozářeného dávkou 99 kGy (11,6%). Naopak nejvyšší hodnota krípu, reprezentována vtiskovým tečením byla zjištěna u neozářeného PP (12,9%), jak je patrné z obrázku (Obr. 32).



Obr. 33. Deformační práce W a koeficient zpětné deformace n_{IT} při zatížení 1 N

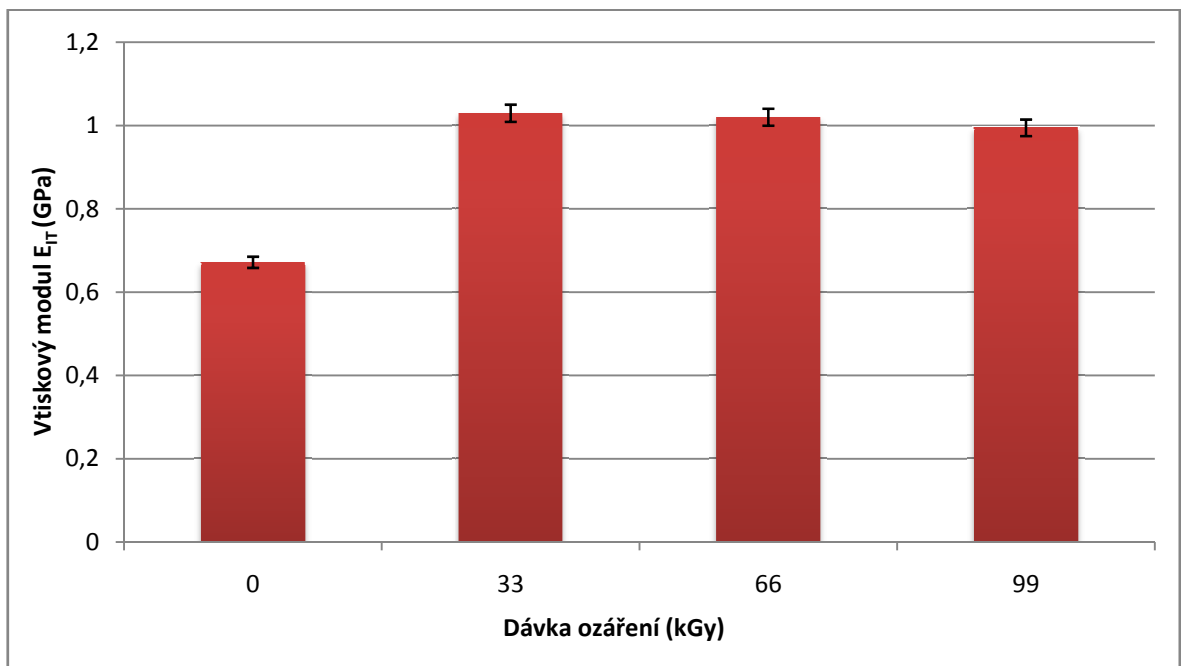
Nejmenší hodnota elastické deformační práce byla zjištěna u PP ozářeného dávkou 33 kGy (4,3 μJ), u plastické deformační práce byla nejmenší hodnota zjištěna u PP ozářeného dávkou 99 kGy (8,3 μJ). Nejvyšší hodnoty jak elastické, tak plastické deformační práce byly naměřeny u neozářeného PP. Z výsledků měření mikrotvrdosti bylo zjištěno, že nejmenší hodnota elastické části deformační práce byla zjištěna u PP ozářeného dávkou 66 kGy (32,7%), zatímco nejvyšší hodnota byla zjištěna u neozářeného PP (35,4%), jak je patrné z obrázku (Obr. 33).

12.3 Měření mikrotvrdomosti při zatížení 5 N



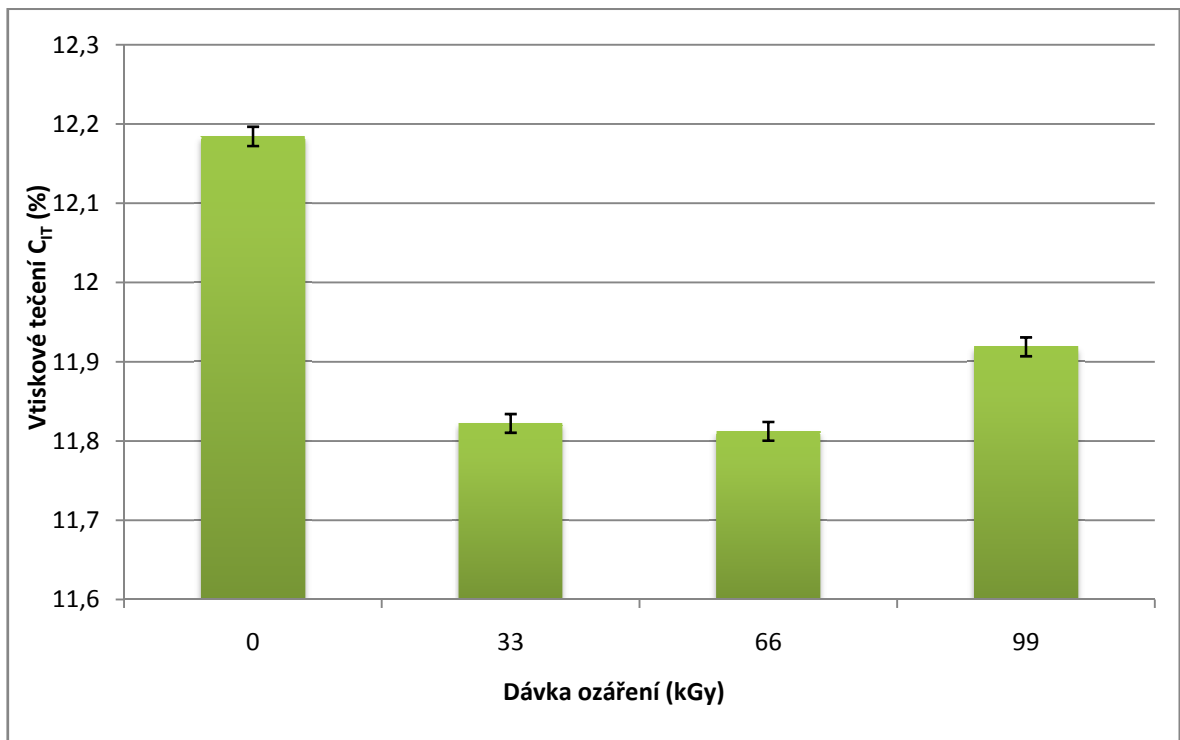
Obr. 34. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 5 N

Z výsledků měření mikrotvrdomosti u testovaného polypropylenu bylo zjištěno, že nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u neozářeného PP (41 MPa). Naopak nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna u PP ozářeného dávkou beta záření 33 kGy (60 MPa), jak je patrné z obrázku (Obr. 34).



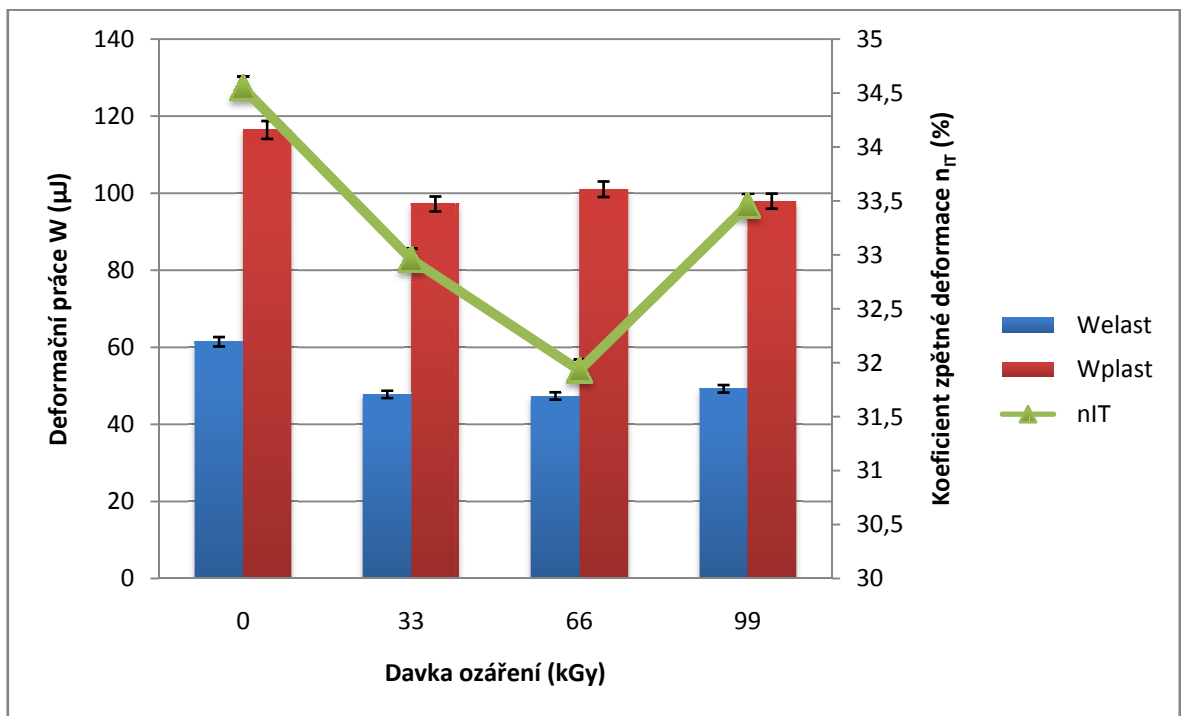
Obr. 35. Vtiskový modul E_{IT} Při zatížení 5 N

Zkouška mikrotvrdomosti provedená na polypropylenu modifikovaném beta záření ukázala, že nejmenší hodnota vtiskového modulu pružnosti, který charakterizuje tuhost testované povrchové vrstvy, byla zjištěna u neozářeného polypropylenu (0,67 GPa). Naopak nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti by naměřena u polypropylenu ozářeného dávkou 33 kGy (1,03 GPa), jak je patrné z obrázku (Obr. 35).



Obr. 36. Vtiskové tečení (creep) C_{rr} při zatížení 5 N

Měření mikrotvrdomosti poskytlo také důležité informace o chování povrchové vrstvy při zatížení konstantní silou v průběhu času. Nejmenší hodnota vtiskového tečení (krípu) byla naměřena u PP ozářeného dávkou 66 kGy (11,8%). Naopak nejvyšší hodnota krípu, reprezentována vtiskovým tečením byla zjištěna u neozářeného PP (12,2%), jak je patrné z obrázku (Obr. 36).



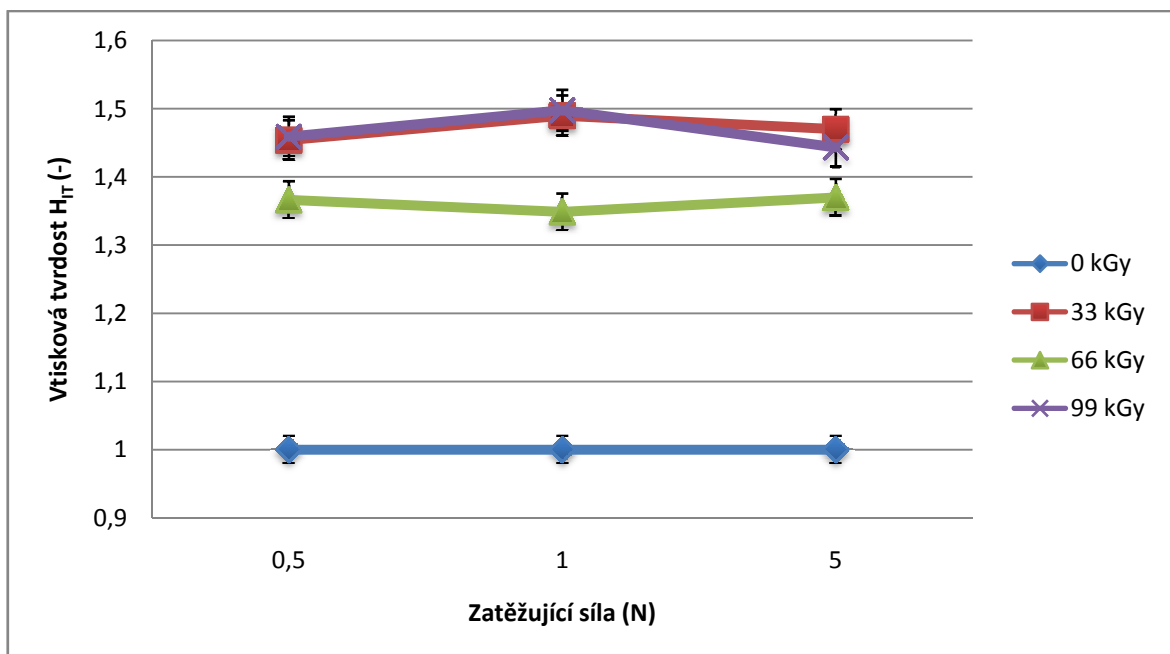
Obr. 37. Deformační práce W a koeficient zpětné deformace n_{IT} při zatížení 5 N

Nejmenší hodnota elastické deformační práce byla zjištěna u PP ozářeného dávkou 66 kGy (47,4 μJ), u plastické deformační práce byla nejmenší hodnota zjištěna u PP ozářeného dávkou 33 kGy (97,2 μJ). Nejvyšší hodnoty jak elastické (61,5 μJ), tak plastické deformační práce (116,5 μJ) byly naměřeny u neozářeného PP. Z výsledků měření mikrotvrdosti bylo zjištěno, že nejmenší hodnota elastické části deformační práce byla zjištěna u PP ozářeného dávkou 66 kGy (31,9%), zatímco nejvyšší hodnota byla zjištěna u neozářeného PP (34,5%), jak je patrné z obrázku (Obr. 37).

13 DISKUZE VÝSLEDKŮ

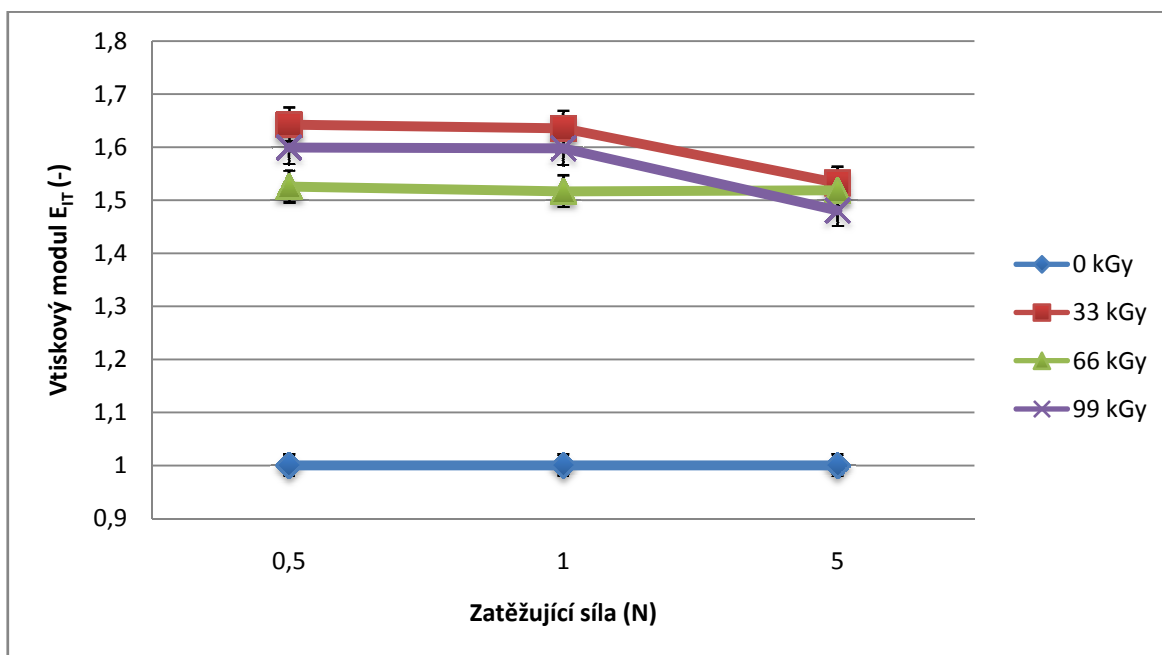
Diplomové práce se zabývá měřením mikrotvrlosti povrchové vrstvy polypropylenu, modifikovaného beta zářením. Testovaná zkušební tělesa byla vyrobena technologii vstřikování na vstřikovacím stroji ARABURG ALLROUNDER 470C. Zkušební tělesa byla následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, a 99 kGy. Měření mikrotvrlosti proběhlo na mikrotvrdoměru Micro-Combi testeru od firmy CSM Instruments, při zatížení 0.5N, 1N a 5N. Každý soubor měření obsahoval 10 kusů zkušebních těles. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

13.1 Srovnání výsledků mikrotvrlosti při různých zatěžujících silách



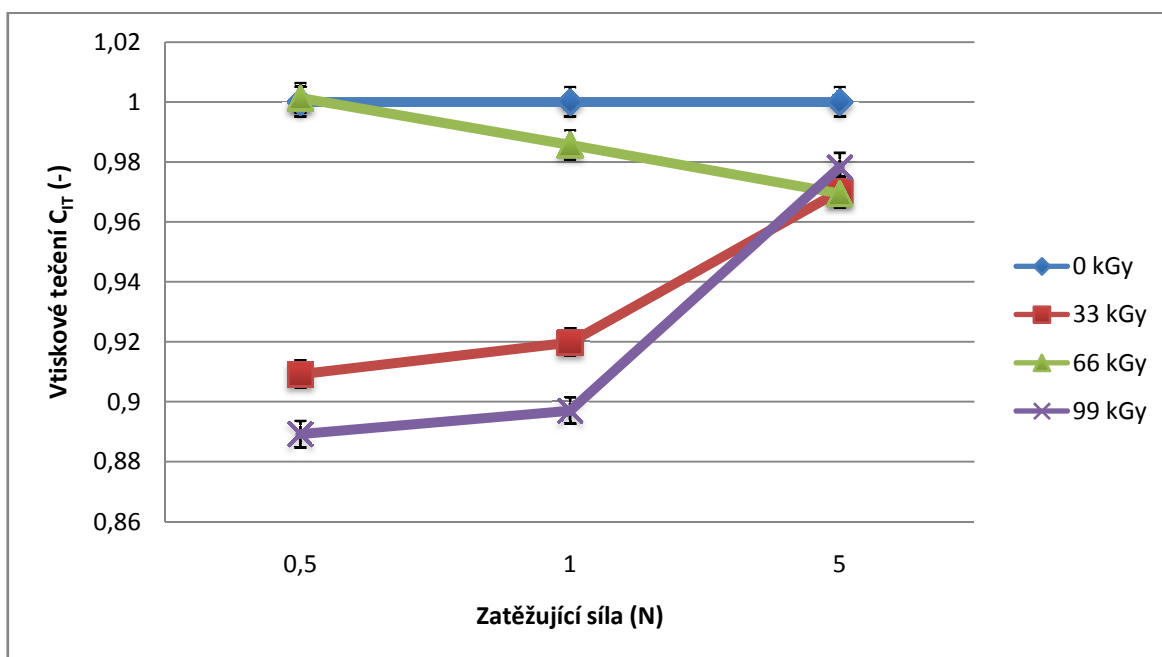
Obr. 38. Srovnání vtiskové tvrdosti H_{IT} při různých zatěžujících silách – bezrozměrný

Hodnoty vtiskové tvrdosti měřené při třech různých zatíženích (0.5N, 1N a 5N) ukázaly, že povrchová vrstva polypropylenu modifikovaného beta zářením, vykazovala změny v jejím chování. U všech aplikovaných zatížení došlo k nárůstu hodnot vtiskové tvrdosti. Nejvyšší nárůst hodnot byl zjištěn při zatížení 1N. K zvýšení hodnot vtiskové tvrdosti (Obr. 42) došlo u dávek ozáření 33 a 99 kGy téměř o 50%. Tento nárůst hodnot indikuje změnu vlastností povrchové vrstvy testovaného polypropylenu. Tato změna byla s největší pravděpodobností vyvolána tvorbou 3D sítě a struktury. U ostatních aplikovaných zatížení byly zaznamenané zvýšené hodnoty méně výrazné. Zlepšením vtiskové tvrdosti může také dojít ke zlepšení odolnosti proti opotřebení, která je zásadní například při výrobě kabelů apod.



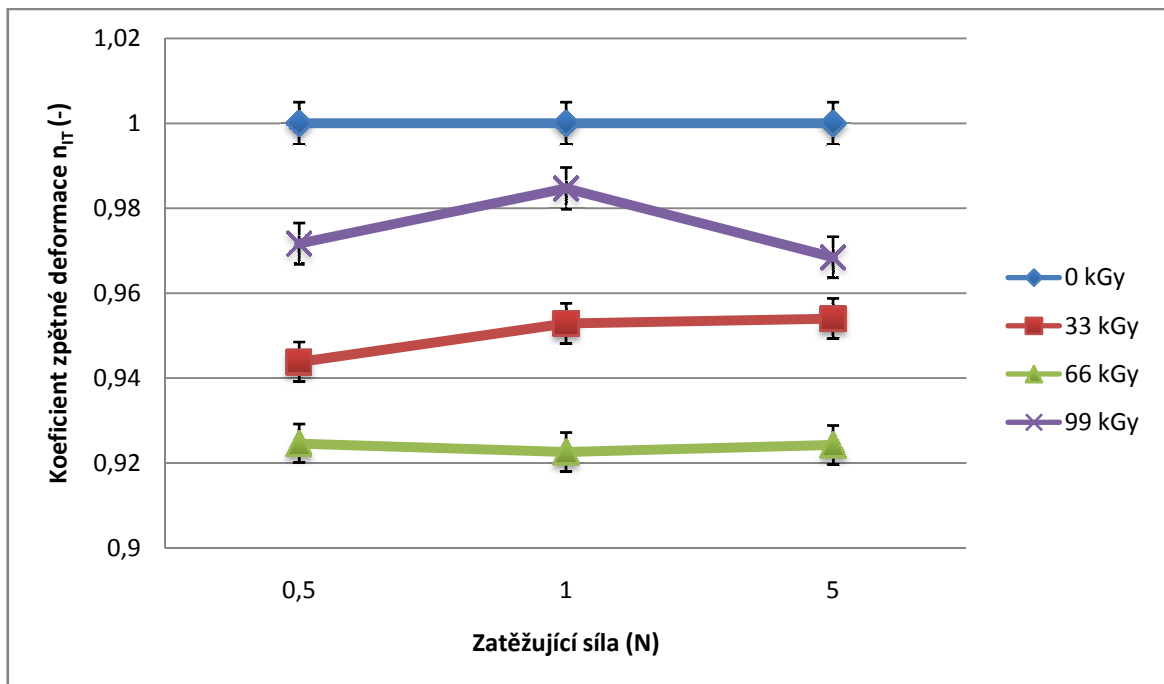
Obr. 39. Srovnání vtiskového modulu E_{IT} při různých zatěžujících silách – bezrozměrný

Ozáření PP beta zářením mělo pozitivní vliv na hodnoty vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované povrchové vrstvy. Nejmenší hodnoty mikrotuhosti byly zjištěny pro všechna aplikovaná zatížení u neozářeného PP. Nejvyšší hodnoty byly zjištěny u dávky ozáření 33 kGy, kde došlo k nárůstu mikrotuhosti povrchové vrstvy až o 65%. Nejvyšší hodnoty mikrotuhosti byly zjištěny při zatížení 0.5N a 1N. U nejvyššího zatížení došlo k určitému poklesu hodnot (Obr. 43).



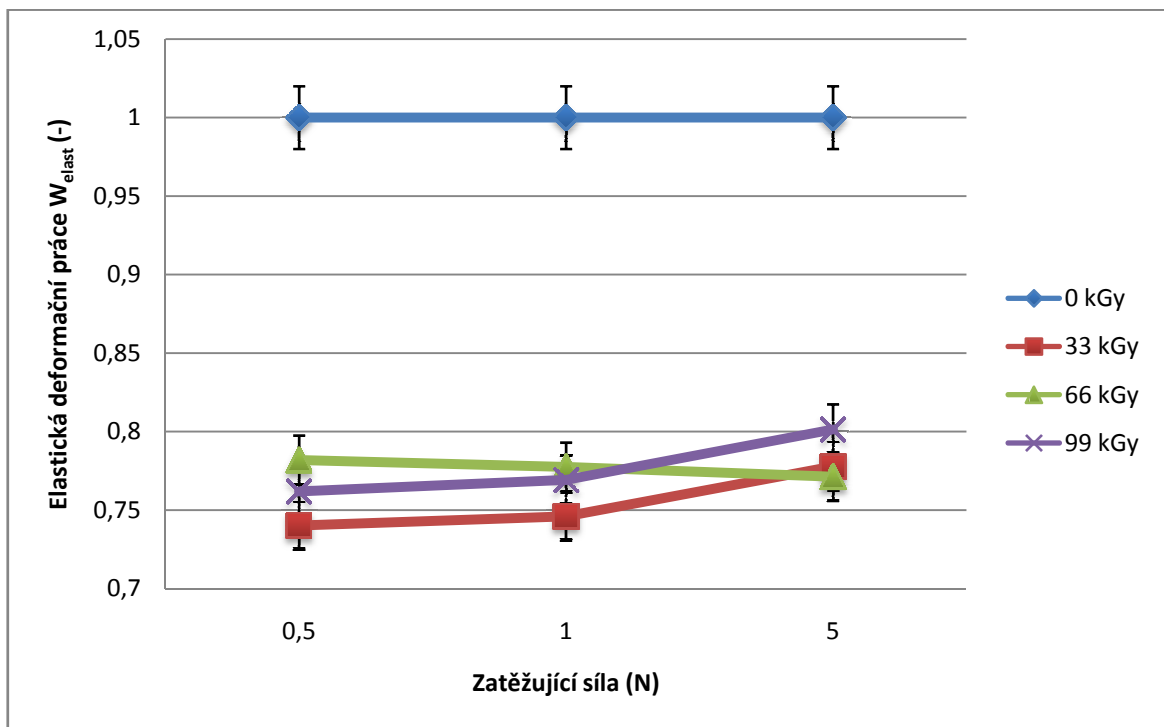
Obr. 40. Srovnání vtiskového tečení C_{IT} při různých zatěžujících silách – bezrozměrný

Odolnost testované povrchové vrstvy PP modifikovaného beta záření proti konstantnímu zatížení v průběhu nám reprezentuje vtiskové tečení. Nejvyšší hodnoty vtiskového tečení (kríp) byly zjištěny u neozářeného PP pro všechna aplikovaná zatížení (0.5N, 1N a 5N). Největší pokles krípu byl naměřen při zatížení 0.5N a 1N u dávek záření 33kGy a 99 kGy. U zmíněných dávek byl zjištěn pokles o 11%. Zvýšené zatížení nepotvrdilo výraznější pokles hodnot krípu (Obr. 44).



Obr. 41. Srovnání koeficientu zpětné deformace n_{IT} při různých zatěžujících silách – bezrozměrný

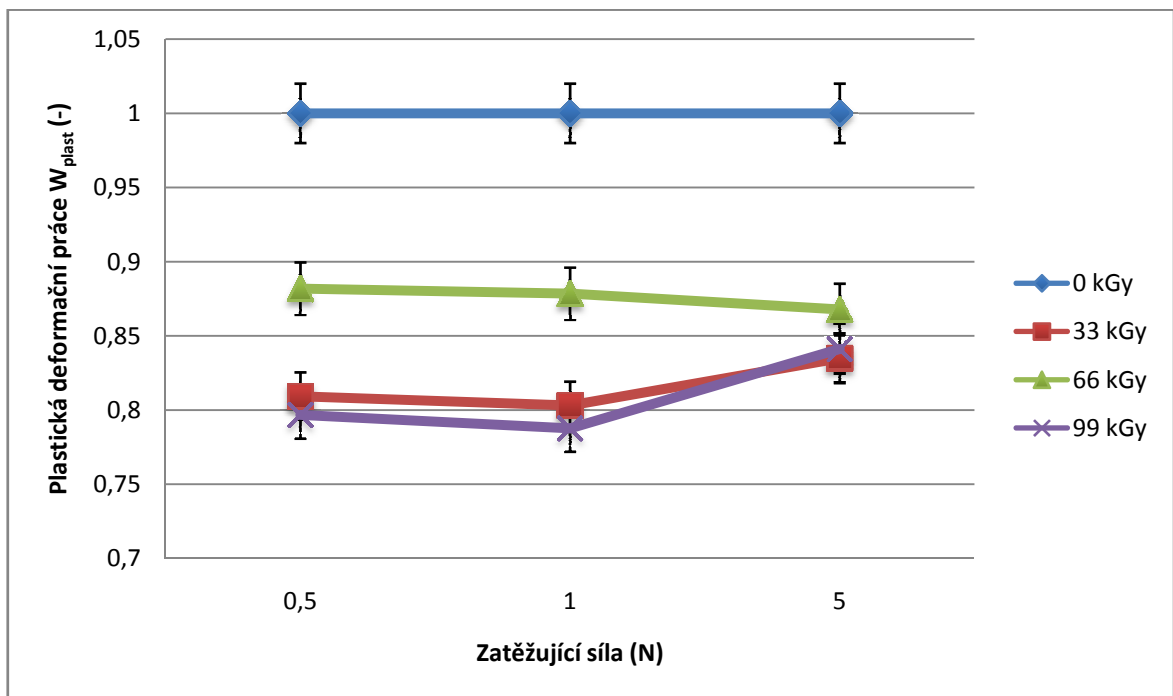
Elastická část deformační práce vykazovala dle výsledků testů mikrotvrdomosti nejmenších hodnoty u PP ozářeného dávkou záření 66 kGy. Nejvyšší hodnoty byly pro všechna aplikovaná zatížení zjištěny u neozářeného PP. Pokles hodnot elastické části deformační práce byl pro dávku ozáření 66 kGy naměřen 8%, jak je patrné z obr. 45. Elastická část deformační práce (koeficient zpětné deformace) nám poskytuje důležité informace o relaxaci provedeného vtisku v testované povrchové vrstvě modifikovaného PP.



Obr. 42. Srovnání deformační práce elastické při různých zatěžujících silách – bezrozměrný

Výsledky elastické a plastické deformační práce při zkoušce mikrotvrlosti ukázaly, že nejvyšší hodnoty byly zjištěny u obou deformačních prací u neozářeného PP (Obr. 46 a Obr. 47). Nejnižší hodnoty elastické deformační práce vykazoval PP modifikovaný dávkou beta záření 33 kGy. Plastická deformační práce vykazovala nejmenší hodnoty u dávek beta záření 33 kGy a 99 kGy. Pro obě deformační práce byl zjištěn nejmenší pokles hodnot u nejvyššího zatížení 5 N.

Ze získaných výsledků ze zkoušky mikrotvrlosti bylo zjištěno, že modifikace PP beta zářením má pozitivní vliv na změnu mikromechanických vlastností testované povrchové vrstvy. Zvýšení hodnot vtiskové tvrdosti, vtiskového modulu pružnosti, vtiskového tečení a pokles hodnot elastické části deformační práce dokazuje, že povrchová vrstva se stává odolnější vůči opotřebení. Pro průmyslovou sféru je to významná skutečnost tam, kde je kladen na tuto oblast velký důraz. Jedná se především o kabely, výrobky, které jsou vystaveny opotřebení apod.



Obr. 43. Srovnání deformační práce plastické při různých zatěžujících silách – bezrozměrný

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá měřením mikrotvrlosti povrchové vrstvy PP modifikovaného beta zářením. Zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování a následně ozářena beta zářením o dávkách 0, 33, 66, 99 kGy. Mikrotvrdot byla měřena při zatížení 0.5N, 1N a 5N na Micro-Combi Testeru od firmy CSM Instruments. Každý testovaný soubor měření obsahoval vždy 10 kusů zkušebních těles. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšší hodnoty mikromechanických vlastností modifikovaného PP byly zjištěny u dávek beta záření 33 kGy a 99 kGy. U vtiskové tvrdosti došlo k nárůstu hodnot až o 50 %. U vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje tuhost testované povrchové vrstvy, byl zaznamenán nárůst o 65%. Kríp poklesl u ozářeného PP o 11 %.

Zlepšení mikromechanických vlastností povrchové vrstvy mohou být zajímavé pro průmyslovou sféru. Tam, kde je vyžadována odolnost proti opotřebení nebo části výrobků, které jsou vystaveny tření, může být modifikovaný PP vhodnou náhradou stávajících typů polymerů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SCHÄTZ, M., VONDRÁČEK, P. *Zkoušení polymerů*. 2. přepr. a dopl. vyd. Praha: VŠCHT, 1988. 276 s. ISBN není.
- [2] *Zkoušky tvrdosti*[online]. 2010 [cit. 2013-10-12]. Dostupný z WWW: <<http://fyzmatik.pise.cz/50943-zkousky-tvrdosti.html>>
- [3] *Zkoušky tvrdosti*[online]. 2013 [cit. 2013-10-12]. Dostupný z WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf>
- [4] DOLEŽAL, P., PACAL, B. *Hodnocení mikrotvrdosti struktury materiálů*. VUT Brno, 2006, 41 s.
- [5] *Zkoumání materiálů nanoindentační metodou* [online]. 2002 [cit. 2013-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://csnmt.fme.vutbr.cz/nano02/sbornik/138.pdf>>
- [6] AUFFAHRTOVÁ, P. Diplomová práce – *Mikrotvrdost kovových materiálů*. Zlín: UTB 2013, 79 s.
- [7] RYBNIKÁŘ, F. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 418 s.
- [8] ŽALEK, T. Bakalářská práce - *Mikrotvrdost modifikovaného PA66 pomocí beta záření*. Zlín: UTB 2013, 74 s.
- [9] *Zkoušky tvrdosti* [online]. 2010 [cit. 2013-10-12]. Dostupný z WWW: <http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrdosti.pdf>
- [10] Tvrdost podle Brinella [online]. 2002 [cit. 2013-10-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-brinell.htm>>
- [11] Tvrdost podle Vickerse [online]. 2002 [cit. 2013-10-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>>
- [12] Tvrdost podle Rockwella [online]. 2002 [cit. 2013-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-rockwell.htm>>
- [13] *Tvrdost podle Knoop* [online]. 2002 [cit. 2013-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-knoop.htm>>
- [14] *Tvrdost podle Shorea* [online]. 2002 [cit. 2013-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-shore.htm>>
- [15] MACHÁČ, M. Bakalářská práce – *Měření tvrdosti materiálů a zpracování zjištěných hodnot*. Brno: VUT 2010, 73 s.

- [16] *Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení* [online]. 2006 [cit. 2013-11-19]. Dostupný z WWW: <<http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>>
- [17] *Tvrдост podle Martense* [online]. 2002 [cit. 2013-11-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.converter.cz/jednotky/tvrдост-martens.htm>>
- [18] DUCHÁČEK, V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 94 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [19] ŠVEC, J. *Radioaktivita a ionizující záření*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 2005, 36 s. ISBN 80-86634-62-0
- [20] *Radiobiologie* [online]. 2010 [cit. 2013-11-20]. Dostupný z WWW: <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14.html>>
- [21] SVORČÍK, V. *Polymery stručně* [online]. [cit. 2013-11-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>>
- [22] *Termoplasty* [online]. 2013 [cit. 2013-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Termoplast>>
- [23] *Reaktoplasty* [online]. 2013 [cit. 2013-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Reaktoplast>>
- [24] *Elastomery* [online]. 2013 [cit. 2013-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Elastomer>>
- [25] RUDOLF, J. *Bakalářská práce – Vliv množství polybutenu na mechanické vlastnosti směsi PP+PB*. Zlín: UTB 2012, 53 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Plocha vytlačeného důlku [mm^2]
c	Rychlost elektromagnetického záření ve vakuu [m/s]
D	Průměr kuličky [mm]
d	Průměr vtisku [mm]
E	Energie [keV]
F	Zatěžující síla [N]
H	Pádová výška [mm]
h	Výška odrazu [mm]
h_r	Hloubka vtisku po odlehčení [μm]
H_{ch}	Mikrotvrдость dle Berkovice
P	Zatížení [N]
P_{max}	Maximální zatížení [N]
k	Přepočítávací koeficient
l	Délka úhlopříčky vtisku [μm]
p	Planckova konstanta [J.s]
P(h)	Indentační křivka
t	Tloušťka materiálu
v	Výška trojúhelníku změřená na vtisku [μm]
W	Zkušební zatížení [N]
α	Záření alfa
β	Záření beta
γ	Záření gama
λ	Vlnová délka záření

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Indentační křivka</i>	15
<i>Obr. 2. Měření tvrdosti podle Brinella</i>	18
<i>Obr. 3. Měření tvrdosti podle Vickerse</i>	20
<i>Obr. 4. Měření tvrdosti podle Rockwella</i>	21
<i>Obr. 5. Měření tvrdosti podle Knoopa</i>	22
<i>Obr. 6. Skleroskop Shore</i>	23
<i>Obr. 7 Princip měření tvrdosti Shoreho skleroskopu</i>	24
<i>Obr. 8. Princip měření tvrdosti duroskopem</i>	25
<i>Obr. 9. Princip měření kladívkem Poldi</i>	26
<i>Obr. 10. Princip měření tvrdosti Baumannovým kladívkem</i>	26
<i>Obr. 11. Berkovicův indentor</i>	31
<i>Obr. 12. Pronikavost jednotlivých druhů ionizujících záření</i>	34
<i>Obr. 13. Záření α</i>	35
<i>Obr. 14. Záření β</i>	36
<i>Obr. 15. Záření γ</i>	37
<i>Obr. 16. Schematické znázornění štěpné reakce</i>	38
<i>Obr. 17. Schéma vzniku brzdného záření</i>	39
<i>Obr. 18. Základní rozdělení polymerů</i>	40
<i>Obr. 19. Některé struktury kopolymerů</i>	42
<i>Obr. 20. Struktura polypropylenu</i>	49
<i>Obr. 21. Stereometrie polypropylenu</i>	50
<i>Obr. 22. Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470 C</i>	52
<i>Obr. 23. Zkušební těleso pro zkoušku tvrdosti</i>	52
<i>Obr. 24. Linka na ozařování</i>	53
<i>Obr. 25. Mikrotvrdoměr – Micro-Combi Tester</i>	54
<i>Obr. 26. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 0,5 N</i>	55
<i>Obr. 27. Vtiskový modul E_{IT} Při zatížení 0,5 N</i>	56
<i>Obr. 28 Vtiskové tečení (creep) C_{IT} při zatížení 0,5 N</i>	57
<i>Obr. 29. Deformační práce W a koeficient zpětné deformace n_{IT} při zatížení 0,5 N</i>	58
<i>Obr. 30. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 1 N</i>	59
<i>Obr. 31. Vtiskový modul E_{IT} Při zatížení 1N</i>	59
<i>Obr. 32. Vtiskové tečení (creep) C_{IT} při zatížení 1 N</i>	60

Obr. 33. Deformační práce W a koeficient zpětné deformace n_{IT} při zatížení 1 N.....	61
Obr. 34. Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 5 N	62
Obr. 35. Vtiskový modul E_{IT} Při zatížení 5 N.....	62
Obr. 36. Vtiskové tečení (creep) C_{IT} při zatížení 5 N.....	63
Obr. 37. Deformační práce W a koeficient zpětné deformace n_{IT} při zatížení 5 N.....	64
Obr. 42. Srovnání vtiskové tvrdosti H_{IT} při různých zatěžujících silách – bezrozměrný.....	65
Obr. 43. Srovnání vtiskového modulu E_{IT} při různých zatěžujících silách – bezrozměrný.....	66
Obr. 44. Srovnání vtiskového tečení C_{IT} při různých zatěžujících silách – bezrozměrný.....	66
Obr. 45. Srovnání koeficientu zpětné deformace n_{IT} při různých zatěžujících silách – bezrozměrný.....	67
Obr. 46. Srovnání deformační práce elastické při různých zatěžujících silách – bezrozměrný.....	68
Obr. 47. Srovnání deformační práce plastické při různých zatěžujících silách – bezrozměrný.....	69

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Sestavení nerostů dle Mohsovy stupnice</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 2. Tvrdost dle Vickerse – tři oblasti zatížení</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 3 Zkušební zatížení pro mikrotvrdost podle Vickerse</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4. Zkušební zatížení pro mikrotvrdost podle Knoopu.....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 5. Označení neutronů podle energie</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6. Vlastnosti izotaktického, syndiotaktického a ataktického PP.....</i>	<i>49</i>