

# Mikrotvrdost' polymerov

Bc.Marcela Zmeková

---

Diplomová práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marcela ZMEKOVÁ**  
Osobní číslo: **T09708**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Mikrotvrдость polymerů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Proveďte přípravu vzorků.
3. Realizace měření mikrotvrđosti.
4. Vyhodnoďte naměřené výsledky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce.**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. David Mañas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**14. února 2011**

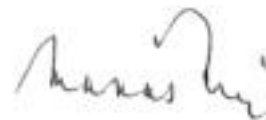
Termín odevzdání diplomové práce:

**13. května 2011**

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.  
*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 <sup>1)</sup>;
- 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 <sup>3)</sup> 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 2.5.2011

.....

---

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> 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).

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Predložená diplomová práca rieši problém merania mikrotvrdości metódou DSI ožiarených polymérov. Boli vybrané dva typy polymérnych materiálov a to PA a PP (plnený, neplnený).

Oba typy polymérnych materiálov boli ožiarené príslušnými dávkami ožiarenia. Materiál PA bol ožiarený dávkami 66, 99 a 132 kGy a bol plnený sieťujúcim činidlom v rozsahu 1 – 6%. Materiál PP bol použitý neplnený a plnený 25% sklenených vlákien a následne ožiarený dávkami 30, 45, 60 a 90 kGy.

Kľúčové slová: Mikrotvrdosť , Vickers, Materiály PA 6 a PP, sieťovanie, ožarovanie

## **ABSTRACT**

This thesis deal with the problem of measuring the micro-hardness method DSI irradiated polymers. Two types of polymer materials were selected. These types were PA and PP (filled, unfilled).

Both types of polymeric materials were irradiated by the appropriate dose of irradiation. The PA material was irradiated by doses of 66, 99 and 132 kGy and was filled with cross-linking reagent in the range of 1-6%. The material was used unfilled PP and filled with 25% glass fibers and then irradiated at 30, 45, 60 and 90 kGy.

Keywords: Micro-hardness, Vickers, Material PA 6 and PP, crosslinkig, irradiation

Najviac by som chcela poďakovať vedúcemu svojej diplomovej práce doc. Ing. Davidovi Maňasovi, Ph.D. za jeho odborné vedenie, ochotne poskytnuté rady a predovšetkým čas, ktorý mi venoval pri vypracovaní diplomovej práce.

Ďalej chcem poďakovať Ing. Martinovi Ovsíkovi za pomoc pri meraní na experimentálnej časti diplomovej práce. Nakoniec ďakujem všetkým ľuďom, ktorý ma podporovali počas celého štúdia.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

Prehlasujem, že som na diplomovej práci pracovala samostatne a použitú literatúru som citovala. V prípade publikácie výsledkov, ak je to uvedené na základe licenčnej zmluvy, budem uvedená ako spoluautor.

V Zlíne:

.....

podpis

## OBSAH

ÚVOD.....	9
<b>I</b> <b>TEORETICKÁ ČASŤ</b> .....	<b>10</b>
<b>1</b> <b>HISTÓRIA</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b> <b>POLYMÉRNÝ MATERIÁL</b> .....	<b>12</b>
2.1    ŠTRUKTÚRA POLYMÉRNÝCH MATERIÁLOV .....	13
<b>3</b> <b>TVRDOSŤ</b> .....	<b>15</b>
3.1    SKÚŠKY TVRDOSTI .....	15
3.1.1    Statické skúšky tvrdosti.....	16
3.1.2    Vnikajúce skúšky tvrdosti .....	16
3.1.3    Skúška podľa Brinella .....	16
3.1.4    Skúška podľa Vickerse.....	18
3.1.5    Skúška podľa Rockwella.....	19
3.1.6    Skúška podľa Knoopu .....	20
<b>4</b> <b>MIKROTVRDOSŤ</b> .....	<b>22</b>
4.1    SKÚŠKY MIKROTVRDOSTI.....	22
4.1.1    Skúška mikrotvrdomerom podľa Vickersa .....	23
4.1.2    Skúška mikrotvrdomerom podľa Berkoviča.....	25
4.1.3    Skúška mikrotvrdomerom podľa Knoopu .....	25
4.1.4    Inštrumentovaná vnikajúca skúška tvrdosti – DSI.....	26
4.2    MIKROTVRDOMERY .....	30
<b>II</b> <b>PRAKTICKÁ ČASŤ</b> .....	<b>34</b>
<b>5</b> <b>CIEĽ DIPLOMOVEJ PRÁCE</b> .....	<b>35</b>
<b>6</b> <b>EXPERIMENTÁLNA ČASŤ</b> .....	<b>36</b>
6.1    MATERIÁL PA VŠEOBECNE .....	36
6.1.1    Použitý materiál PA 6 .....	37
6.2    MATERIÁL PP VŠEOBECNE .....	38
6.2.1    Použitý materiál PP .....	39
6.2.2    Sieťujúce činidlo .....	40
6.2.3    Ožiarovanie vzorkov .....	41
6.2.4    Jednotky používané pri ožiarovaní.....	41
<b>7</b> <b>SKÚŠKA MIKROTVRDOSTI</b> .....	<b>43</b>
7.1    HODNOTY ZÍSKANÉ METÓDOU DSI .....	48
7.2    VÝSLEDKY Z MERANIA MIKROTVRDOSTI.....	49
7.2.1    Výsledky mikrotvrdomerom materiálu PA .....	49
7.2.2    Výsledky mikrotvrdomerom materiálu PP .....	67
<b>DISKUSIA VÝSLEDKOV</b> .....	<b>73</b>
<b>ZÁVER</b> .....	<b>80</b>
<b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY</b> .....	<b>81</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK</b> .....	<b>82</b>
<b>ZOZNAM OBRÁZKOV</b> .....	<b>84</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK</b> .....	<b>87</b>



## ÚVOD

Priemysel výroby a spracovania polymérov bol vždy pomerne významným priemyslovým odvetvím a má v ČR dlhoročnú tradíciu. Svoje postavenie si toto priemyslové odvetvie zahrnujúce gumársky a plastikársky priemysel stále drží a dnes patrí gumárstvo a aj spracovanie plastov k úspešným a rozvíjajúcim sa odborom.

Sektor spracovania polymérov je veľmi členitý, pretože predstavuje výrobu obrovského množstva výrobkov pre najrôznejšie aplikácie. Výrobky z polymérov a kompozitov s polymérou maticou nachádzajú stále lepšie uplatnenie. Z polymérov sú vyrábané predmety bežnej potreby, predmety pre šport a voľný čas, prístroje pre domácnosť, obaloviny pre priemyslové výrobky aj potraviny a stále viac sa uplatňujú v stavebníctve, elektrotechnike a elektronike, strojárstve a automobilovom priemysle. Veľmi špecifické je uplatnenie v zdravotníctve. Nárast výroby je zaznamenaný takmer vo všetkých sledovaných skupinách výrobkov. Ešte názornejšie túto situáciu zahnuje celkový vývoj produkcie v gumárskom priemysle.

Meranie metódou DSI (Depth Sensing Indentation) patrí medzi nové metódy, ktoré poskytujú dôležité informácie o samotnom type materiálu. Zásadné vylepšenie metodológie, analýzy a všetky dokumenty urobili až Oliver a Pharr na začiatku osemdesiatich rokov. Princípom metódy je, že merací prístroj zaznamenáva súčasne okamžitú zmenu hĺbky prieniku indentoru do skúmaného materiálu v závislosti na plynulom náraste/poklese zaťaženia v priebehu celého zaťažovaného a odľahčovaného procesu. Grafickým spracovaním hodnôt vzniká charakteristická indentačná krivka zaťaženie - hĺbka odtlačku. Pomocou modernej výpočtovej techniky môžeme potom z výsledkov merania dostať údaje nie len o samotnom skúšanom materiálu, ale aj o spôsobe jeho výroby a procesných parametrov, ktoré boli použité u výroby.

## **I. TEORETICKÁ ČASŤ**

## 1 HISTÓRIA

Jeden z najstarších spôsobov skúšania mikrotvrdości realizoval v roku 1722 Réamur pomocou tyče s premenlivou tvrdosťou od jedného konca k druhému, pričom hodnota tvrdosti bola určovaná podľa polohy a vrypu, ktorú skúšaný materiál na meranej tyči zanechal. Ďalším stupienkom vo vývoji merania bola známa Mohsova stupnice (v roku 1822 Friedrich Mohs) relatívnej povrchovej tvrdosti, ktorá zahrňovala desať minerálov v rozsahu od 1 do 10. Autorom vrypovej skúšky je Martens. Skúška spočíva v ťažení ramienka opatreného diamantovým hrotom (s vrcholovým uhlom  $90^\circ$ ) po vyleštenom povrchu skúšaného vzorku a merania šírky výsledného vrypu. Číslom tvrdosti bolo aplikované zaťaženie, ktoré na povrchu vzorku vytvorilo vryp široký 0,1 mm. Výhodou bola možnosť využiť jediného záznamu k meraniu relatívnej tvrdosti rôznych fáz a zložiek obsiahnutých v mikroštruktúre vrátane zmien tvrdosti na hranici zrna. Kvantitatívne meranie tvrdosti bolo postupne rozvíjané až do doby, kedy sme schopný hodnotiť tvrdosť pomocou presne daných podmienok merania, čo umožňuje veľa aplikácií. [1]

*Tab. 1 Mohsova stupnice tvrdosti a tvrdosť niektorých látok podľa tejto stupnice*

Látka	Mohsova stupnice tvrdosti	Látka	Tvrdosť podľa Mohsovy stupnice
Mastenec	1	Grafit	1,2
Sadrovec	2	Olovo	1,5
Vápenec	3	Cín	1,8
Fluorit	4	Asfalt	1 – 2
Apatit	5	Hliník	2,9
Živec	6	Meď	3
Kremeň	7	Sklo	4,5 – 6,5
Topás	8	Kremík	7
Korund	9	Oceľ	5 – 8,5
Diamant	10	Karbid kremíku	9,5 - 10

## 2 POLYMÉRNÝ MATERIÁL

Slovo polymér sa skladá z dvoch častí, *poly* znamená mnoho a *mer* jednotka. Polymérne materiály sa teda skladajú z veľkých molekúl, ktoré obsahujú mnoho opakujúcich sa rovnakých jednotiek. Tieto veľké molekuly sa nazývajú makromolekuly alebo polymérne reťazce. Z chemického hľadiska sú polyméry najčastejšie zlúčeniny uhlíku a vodíku, často obsahujú tiež kyslík, dusík, síru, chlór a ďalšie.

Medzi typické vlastnosti polymérnych materiálov patrí veľmi malá hustota i tvrdosť, v porovnaní s kovmi relatívne malá pevnosť v ťahu (s výnimkou polymérnych vlákien) a malá tepelná odolnosť. Polymérne materiály sú väčšinou elektrické izolanty. Okrem malej hustoty je veľkou výhodou polymérov oproti kovu, sklu alebo keramike tiež relatívne nízka energetická náročnosť výroby. V porovnaní s kovy sú však polyméry pomerne ťažko recyklovateľné.

### Polymérne materiály sa delia do troch skupín:

- Termoplasty
- Reaktoplasty (termosety, živice)
- Elastomery (kaučuky)

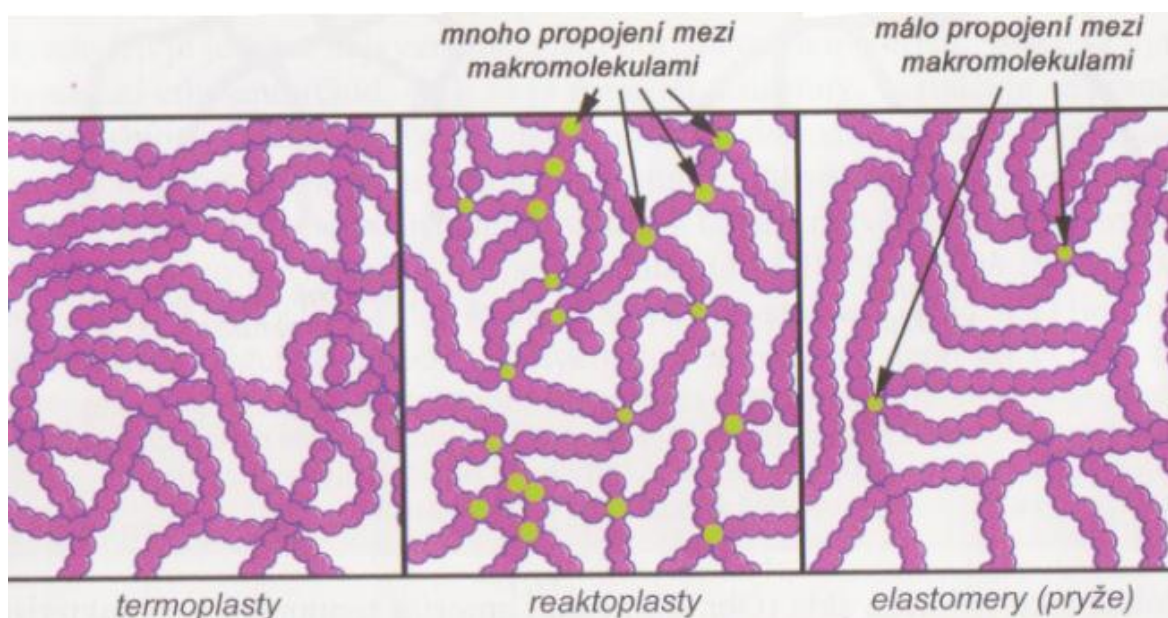
**Termoplasty** sú také polymérne materiály, ktoré za zvýšených teplôt mäknú a prechádzajú do plastického stavu a za týchto podmienok ich môžeme tvarovať. Zástupcami termoplastov sú polyetylen, polyvinylchlorid, polypropylén, polystyrén atď.

**Reaktoplasty** (termosety, živice) sa chovajú odlišne. Pri zahriati polotovaru, ktorý má tvar budúceho výrobku dôjde k jeho vytvrdeniu a zmena štruktúry (zosieťovanie) je nevratná. Výsledkom je tuhý a tvrdý materiál, ktorý pri opätovnom zahriatí nemäkne ani sa netaví. Medzi reaktoplasty patria: epoxidové živice, polyesterové živice, fenolformaldehydové živice (bakelit).

**Elastomery** (kaučuky) sú materiály schopné veľkej deformácie pri mechanickom zaťažení. Táto deformácia je elastická (pružná), čo znamená, že po odľahčení sa materiál vracia do pôvodného tvaru. Zástupcami elastomerov sú kaučuky napríklad styrenbutadiénový kaučuk alebo isoprenový kaučuk.

## 2.1 Štruktúra polymérnych materiálov

Polymérne materiály ako bolo uvedené vyššie sa skladajú z makromolekúl, v ktorých sú atómy prvkov vzájomne zviazané kovalentnými väzbami. Dôležitou vlastnosťou polymérnych materiálov je hmotnosť makromolekúl, na ktorej závisí veľa fyzikálnych vlastností. S rastúcou molekulovou hmotnosťou napríklad rastie viskozita taveniny, teplota mäknutia, pevnosť aj tepelná stabilita polymérnych materiálov, naproti tomu sa znižuje rozpustnosť v kvapalných rozpúšťadlách. Na rozdiel od nízko-molekulárnych látok nemajú však všetky makromolekuly v polymérnom materiálu rovnakú hmotnosť, jej hmotnosť leží vždy v určitom intervale.

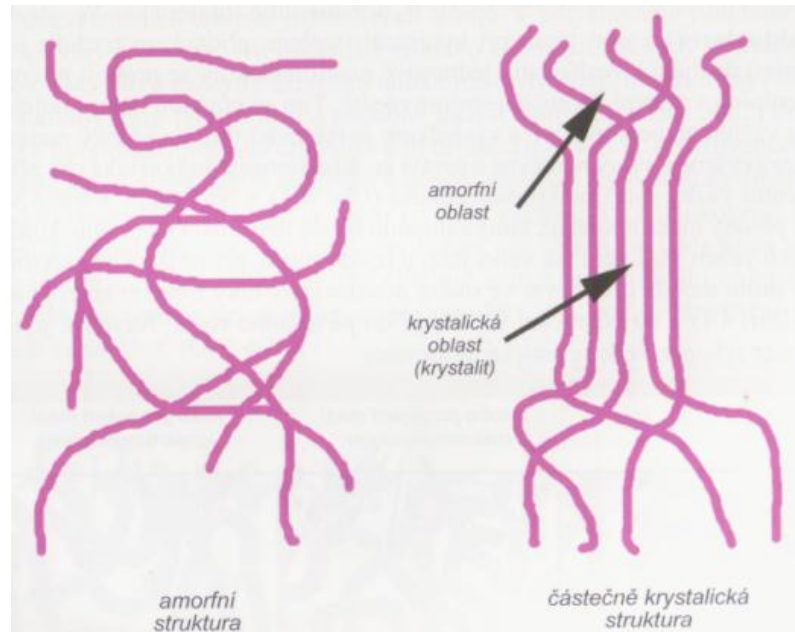


Obr. 1 Štruktúra makromolekúl

Z hľadiska vzájomného usporiadania makromolekúl môže byť polymérny materiál amorfný alebo čiastočne kryštalický.

Stupeň kryštalinity, teda objemový podiel štruktúry môže u niektorých polymérov dosahovať až 95%. Kryštalinita však nemôže dosiahnuť 100%, pretože makromolekuly nie sú všetky rovnako veľké, takže sa nemôžu pravidelne usporiadať v celom objemu materiálu.

S rastúcim stupňom kryštalinity polymérov obvykle rastie pevnosť aj hustota a zlepšuje sa chemická odolnosť. [2]



Obr. 2 Makromolekulárny reťazec v amorfných a semikryštalických polymérnych materiáloch

### 3 TVRDOSTĚ

Tvrdość [H] je definovaná ako odpor proti vnikaniu cudzieho telesa do povrchu skúšaného materiálu. Posudzujeme ju podľa veľkosti stopy, ktorá vznikla vlačovaním telesa vhodného tvaru (guľka, ihlan, kužel) a z dostatočne tvrdého materiálu do skúšaného vzorku určitou silou za definovaných podmienok. Meranie tvrdosti je v porovnaní s ostatnými mechanickými skúškami rýchle a jednoduché. Výhodou je možnosť skúšať hotové výrobky bez ich deštrukcie alebo znehodnotenia. Preto patria skúšky tvrdosti medzi prevozne aj laboratórne najviac používané mechanické skúšky.[3]

Tvrdość ďalej posudzujeme podľa veľkosti trvalej deformácie (odtlačku), ktorú vlačované cudzie teleso v povrchu vzorku vyvolá. Vnikajúce teleso nesmie podliehať plastickým deformáciám a preto musí vykazovať vysokú tvrdosť, Youngov model a mez pevnosti – najčastejšie sa ako materiál indetoru volí diamant. Vzhľadom ku skutočnosti, že pri meraní tvrdosti dochádza k viacosému namáhaniu meraného vzorku, sú výsledné hodnoty tvrdosti ovplyvnené celou radou faktorov a výsledná tvrdosť je ovplyvnená komplexom mechanických a fyzikálnych vlastností, napríklad záleží na:

- Elastických vlastnostiach meraného materiálu,
- Plastických vlastnostiach skúšaného materiálu,
- Veľkosti zaťažujúcej sily a rýchlosti, ktorou indetor vniká do meraného vzorku.[4]

#### 3.1 Skúšky tvrdosti

Skúšky tvrdosti sú najpoužívanéjšie mechanické skúšky materiálu. Dávajú cenné charakteristiky odporu proti tvárnej deformácie na malých alebo dokonca mikroskopických objemoch materiálu. I keď majú skúšky tvrdosti veľké uplatnenie v praxi nemôžeme obísť dôležitú okolnosť, že získanú hodnotu tvrdosti nemôžeme jednoznačne definovať ako fyzikálnu veličinu. Je to spôsobené tým, že tvrdosť závisí na celej rade podmienok merania. Tieto podmienky sú pre veľké množstvo používaných skúšok tvrdosti rôzne a spôsobujú, že u jedného materiálu môže byť stanovené množstvo rôznych tvrdostí, ktoré môžeme porovnávať len empiricky. Nie je stanovené jednotné určovanie tvrdosti, takže hodnoty tvrdosti sa udávajú v najrôznejších stupniciach bez exaktného vzájomného vzťahu. Tieto okolnosti sú rozhodne najväčším problémom tejto tak rozšírenej skúšky.[5]

Skúšky tvrdosti môžeme rozdeliť podľa rôznych metód:

- Vrypové (Martens)
- Vnikajúce (Brinell, Knoop, Rockwell, Vickers)
- Odrazové (Shore)
- Kyvadlové

Podľa charakteru zaťažujúcej sily:

- Statické (tvrdosť podľa Brinella, Knoopa, Rockwella, Vickerse)
- Dynamické (Poldiho kladivo, Baumanovo kladivo, Shoreho skleroskop)

Skúška tvrdosti sa prevádza vždy na povrchu predmetu. Pri skúške záleží najčastejšie vo vtlačovaní cudzieho telesa do skúšaného materiálu, kde vzniká v malom objemu materiálu priestorové napätie. Tvrdosť sa posudzuje podľa deformácie za pôsobením stálej sily alebo podľa sily pri rovnakej deformácii materiálu. Čím menší je odpor proti týmto deformáciám, tým menšie zaťaženie je potreba k dosiahnutiu určitej deformácii a tým menšiu tvrdosť má skúšané teleso. [5]

### 3.1.1 Statické skúšky tvrdosti

Do statických skúšok tvrdosti zaraďujeme skúšky vrypové a vnikajúce.

Vrypová skúška (podľa Martensa) vychádza z metódy používanej v mineralógii. Táto skúška patrí medzi najstaršie spôsoby skúšania tvrdosti, kde sa ku klasifikácii tvrdosti používa Mohseovy stupnice tvrdosti (Tab.1). Na stupnici je zoradených 10 nerastov, z nich každý nasledujúci je schopný vyryť do všetkých predchádzajúcich nerastov vryp.[3,5]

### 3.1.2 Vnikajúce skúšky tvrdosti

Tieto skúšky sú najrozšírenejšie a najvýznamnejšie. Odtlačok sa vytvára pozvoľným vtlačovaním príslušného vnikajúceho telesa plynule sa zväčšujúcou silou kolmo do skúšaného povrchu. Základnými skúškami tejto skupiny sú skúšky podľa Brinella, Rockwella a Vickerse.

### 3.1.3 Skúška podľa Brinella

Skúška podľa Brinella (ČSN 42 0371) patrí ku skúškam tvrdosti na princípe vtlačovaní. Vtlačovaným predmetom u tejto skúšky je guľka s priemerom  $D$ , ktorá sa vtlačuje do



skúšaného materiálu. Po odľahčení sa zmeria priemer odtlačku  $d$  a stanoví a z neho tvrdosť.[5,11]

Tvrdosť sa stanovuje pomerom zaťaženia k ploche guľovitého odtlačku vzťahom:

$$HB = \frac{0,102F}{A} \quad (1)$$

$$HB = \frac{0,102F}{\frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

kde  $F$  je zaťažujúca sila [N], poprípade

$$HB = \frac{F}{A} [kg/mm^2] \quad (3)$$

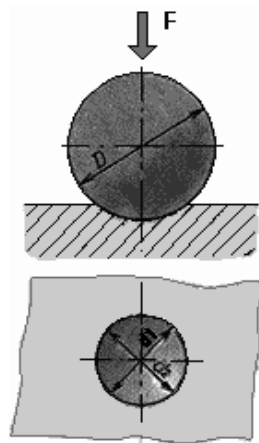
$$HB = \frac{F}{\frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

kde  $F$  je zaťažujúca sila,

$A$  – plocha odtlačku [ $mm^2$ ],

$d$  – priemer odtlačku [mm]. [3]

Rozmer tvrdosti podľa Brinella  $HB$  je udávaný v  $kg/mm^2$ , obvykle sa však v údajoch tvrdosti rozmer vynecháva. V praxi sa upúšťa od dlhých výpočtov a tvrdosť sa určuje z tabuliek, zostavených pre normované zaťaženie  $F$ , zvolené priemery guľiek  $D$ . Skúška zanecháva po sebe malú jamku, ktorá sa dá i inokedy zmerať, takže kontrola je možná kedykoľvek.

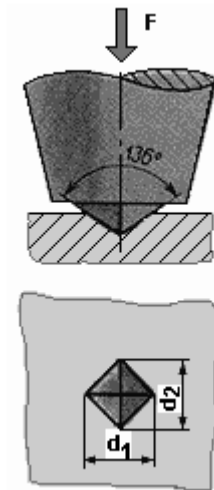


Obr. 3 Skúška tvrdosti podľa Brinella [6]

Pri vtláčovaní guľky do povrchu skúšaného materiálu nastáva v mieste styku deformácia. Táto deformácia závisí na pružných a tvárných vlastnostiach materiálu a na jeho schopnostiach plastického toku a spevňovania. Priemer odtlačku  $d$  sa meria vhodným meracím prístrojom vo dvoch na seba kolmých smeroch. Rozdiel medzi obidvoma nameranými hodnotami nesmie prekročiť 5%. Meranie musí ďalej spĺňať tieto podmienky: povrch skúšaného predmetu musí byť rovný, hladký bez nečistôt. Hrúbka predmetu nesmie byť menšia ako 8-násobok hĺbky odtlačku.[3,5]

### 3.1.4 Skúška podľa Vickerse

Pri zisťovaní tvrdosti podľa Vickerse (ČSN 42 0374) sa vtláča do skúšaného materiálu štvorboký ihlan o vrcholovom uhle strán  $136^\circ$  ako vidíme na obrázku. [5,12]



Obr. 4 Skúška podľa Vickerse [6]

Tvrdosť sa vyjadruje ako pomer zaťaženia vnikajúceho telesa  $F$  k ploche odtlačku (plášť ihlanu):

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2} \quad (5)$$

$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (6)$$

kde  $F$  je zaťažujúca sila [N], poprípade:

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (7)$$

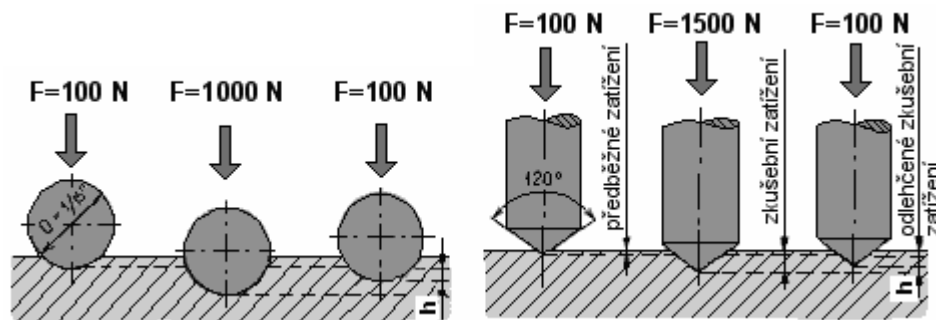
$d$  – aritmetický priemer dĺžky uhlopriečok odtlačku [mm].

Odtlačky pri skúške podľa Vickerse sú i pri rôznych zaťaženiach geometricky podobné a preto môžeme voliť zaťaženie ľubovoľné. Vzhľadom k malým rozmerom odtlačku je často nutná úprava meraného povrchu brúsením. Hrúbka predmetu musí byť rovnaká alebo väčšia  $1,5d$ . Rovnako najmenšia vzdialenosť odtlačku od kraja vzorku je stanovená normou.

### 3.1.5 Skúška podľa Rockwella

Skúška podľa Rockwella (ČSN 42 0373) i keď patrí medzi vnikajúce (vtlačovanie) je prevádzaná na úplne inom základe ako predchádzajúce skúšky Brinella a Vickerse.

Tvrdosť podľa Rockwella sa zisťuje ako rozdiel odtlačku vnikajúceho telesa (ocelová guľka, diamantový kužeľ) medzi dvoma stupňami zaťaženia (predbežného a celkového). Účelom predbežného zaťaženia je vylúčiť z meranej hĺbky nepresnosti povrchových plôch. Kužeľ má vrcholový uhol  $120^\circ$  a polomer guľovej časti 0,2 mm (HRA, HRC). Guľka má priemer 1,5875 mm (HRB). [13]



Obr. 5 Skúška podľa Rockwella

Diamantový kužeľ alebo ocelová guľka, ktorá sa dotýka povrchu skúšaného predmetu sa najprv predbežne zaťaží silou 100 N (počiatočná poloha pre meranie hĺbky odtlačku). Potom sa pomaly zväčšuje zaťažovaná sila tak, aby sa za 3 až 6 sekúnd dosiahlo zaťaženie predpísané normou (napríklad predbežné zaťaženie silou 100 N + skúšobné zaťaženie silou 1400 N = celkové zaťaženie silou 1500 N). Potom sa zaťažujúca sila opäť znižuje až na 100 N a v tomto stave sa zisťuje prírastok  $h$  hĺbky odtlačku, ktorý nastal proti počiatočnej polohe pri 100 N. Skúška tvrdosti podľa Rockwella je rýchla a jednoduchá a odtlačky sú veľmi malé (max. hĺbka 0,2 mm). Je vhodná pre bežnú kontrolu veľkých sérií výrobkov a tam, kde HB už nie je použiteľná.

*Normalizované skúšky podľa tvrdosti:*

U nás sú normalizované tri skúšky tvrdosti podľa Rockwella. Tvrdosť zistenú pri týchto skúškach označujeme **HRA**, **HRB**, **HRC**. Voľba Rockwellovy stupnice (druhu vnikajúceho telesa) závisí hlavne na predpokladanej tvrdosti skúšaného materiálu.

**HRA** – Tvrdosť určená diamantovým kužeľom pri celkovom zaťažení 600 N. Pre spekané karbidy a tenké vrstvy.

**HRB** – Tvrdosť určená oceľovou guľkou (B = ball) pri celkovom zaťažení 1000 N. Pre mäkšie kovy (25 – 100 HRB).

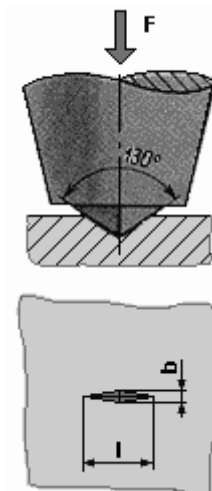
**HRC** – Tvrdosť určená diamantovým kužeľom (C = cone) pri celkovom zaťažení 1500 N.

Doporučuje sa používať pre rozsah  $HRC = 20 - 67$ . [6]

### 3.1.6 Skúška podľa Knoop

Do povrchu materiálu sa vtlačuje pod zaťažujúcou silou  $F$  (pôsobí kolmo na povrch vzorku) štvorboký diamantový ihlan (pomer uhlopriečok 7:1, uhly  $130^\circ$  a  $172,5^\circ$ , pomer dĺžok uhlopriečky k hĺbke je 30).

Metoda podľa Knoop patrí medzi metódy *merania mikrotvrdosti*. Metoda je vhodná pre tenké plastové dosky, tenké kovové dosky, krehké materiály alebo pre materiály, u ktorých nesmie byť použitá sila väčšia ako 3,6. Zaťažujúca sila u metódy podľa Knoop sa pohybuje medzi 25 – 3600.



Obr. 6 Skúška podľa Knoop [6]

Tvrdość podľa Knoopu sa vyjadruje bezrozmerné:

$$HK = (1,4509 \cdot F) / l^2 \quad (8)$$

F – zaťažujúca (pôsobiaci sila)[N],

l – dĺžka dlhšej uhlopriečky odtlačku [mm].

Pri meraní tvrdosti podľa Knoopu sú kladené vysoké nároky na úpravu skúšaného materiálu a na ostrosť hrán vnikajúceho telesa.

## 4 MIKROTVRDOŠŤ

Tieto skúšky sú používané na meranie tvrdosti veľmi malých predmetov, tenkých vrstiev, prípadne v metalografii na meranie tvrdosti jednotlivých štruktúrnych zložiek. Meranie tvrdosti je realizované vtláčovaním diamantového telesa tvaru Vickersova alebo Knopova ihlanu do povrchu meraného telesa silami v rozsahu od 1g (0,09807 N) do 1000g (9,807N). Indentor tvaru štvorbokého ihlanu je do skúšobného telesa tlačný pod určitým zaťažením, ktoré pôsobí v kolmom smere stanovenú dobu. Po odľahčení sa odmerajú uhlopriečky odtlačku. Bežné skúšky (makro)tvrdosti podľa Vickerse sú robené pri zaťaženiach medzi 10 a 1200N. Prvé použitie sily menšej ako 10N sa datuje do roku 1932, kedy boli tieto skúšky urobené v National Physical Laboratory vo Veľkej Británii.[1]

S klesajúcimi aplikovanými silami (sa znižujú veľkosti odtlačku) pri meraní tvrdosti presnosť merania klesá. Pretože odtlačky pri mikrotvrdosti sú malé, je použitie tejto metódy vhodné pre:

- Malé alebo tenké vzorky,
- Meranie tvrdosti malých, vybraných oblastí skúšobného vzorku,
- Meranie mikrotvrdosti štruktúrnych zložiek a fáz,
- Hodnotenie vrstiev po chemicko-tepelnom spracovaní,
- Meranie tvrdosti veľmi tenkých kovových a iných anorganických povlakov,
- Hodnotenie zvarových spojov,
- Pre hodnotenie odhličovacích procesov,
- Štúdium difúzných pochodov,
- Meranie krehkých materiálov, atď.

### 4.1 Skúšky mikrotvrdosti

Skúšky tvrdosti s malým zaťažením na diamant, aj keď sú v princípe rovnaké s bežnými skúškami (makro) tvrdosti sa začali prakticky uplatňovať až po roku 1935. Rozšírenie týchto skúšok však bolo také, že v dnešnej dobe je známe veľké množstvo prístrojov. Makrotvrdosť nám zisťuje tvrdosť jednotlivých kovov ako kryštalického celku, ale pri meraní mikrotvrdosti môžeme stanoviť tvrdosti jednotlivých štruktúrnych vrstiev kovov.[1]

Skúškami mikrotvrdosti môžeme určiť tvrdosť jednotlivých štruktúr vrstiev a z nich stanoviť nerovnorodosti materiálu v závislosti na jeho chemickom zložení, spôsob spracovania

a submikroskopického usporiadania. Sila, pri ktorej sa vtlačuje skúšobné teleso do skúšobného vzorku, je v tomto prípade ďaleko menšia ako u skúšok makrotvrlosti. Povrch predmetu musí byť vybrúsený a vyleštený pripravený ako pre mikroskopické pozorovanie.

Oblasť použitia skúšok mikrotvrlosti je veľmi rozsiahla a používa sa napríklad pri zisťovaní tvrdosti v brite nástroja alebo veľmi blízko hrany, zisťovanie tvrdosti jemných drôtov, najjemnejších plechov, povrchových tvrdých vrstiev, povlakovaných predmetov, ochranných náterov, atď. [1]

#### 4.1.1 Skúška mikrotvrlosti podľa Vickersa

Princíp, priebeh a podstata skúšok tvrdosti a mikrotvrlosti sa od seba vzájomne nijak neodlišujú. Hlavný rozdiel medzi skúškami je vo veľkosti zaťaženia, ktorá pôsobí na indentor. Skúška tvrdosti podľa Vickersa je predpísaná normou ČSN EN ISO 6507-1, a to pre tri rozdielne oblasti skúšaného zaťaženia (viz. Tab. 2). Hodnoty zaťaženia, udávané európskou normou sú v kilogramoch. Dôvodom je historické hľadisko, pretože zaťaženie pre tvrdosť a z toho plynúca jednotka tvrdosti, bola stanovená pred prijatím medzinárodnej sústavy jednotiek. V súčasnej dobe sa uvažuje o revízii a výhodnosti udávať zaťaženie pre tvrdosť v zaokrúhlených jednotkách sily – newtonoch. [4]

Tab. 2 Tvrdosť podľa Vickersa – oblasti skúšobného zaťaženia pre kovové materiály

Oblasť skúšobného zaťaženia, F (N)	Označenie tvrdosti	Rozdelenia skúšok podľa ISO 6507-1
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Skúška tvrdosti podľa Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	$HV 0,2$ až $< HV 5$	Skúška tvrdosti podľa Vickerse pri nízkom zaťažení
$0,09807 \leq F < 1,961$	$HV 0,01$ až $< HV 0,2$	Skúška mikrotvrlosti podľa Vickerse

Pri meraní tvrdosti sa používa zaťaženie v kilogramoch, ale zaťažujúca sila sa udáva v newtonoch. Napríklad označenie  $HV10$  znamená, že pri skúške bolo použité zaťaženie  $10\text{kg}$ , ale maximálna sila dosiahnutá v priebehu skúšky, ktorá pôsobila na indentor, bola  $98,07\text{N}$ . Pri skúške mikrotvrlosti podľa Vickerse, je do meraného vzorku vtlačovaný pravidelný štvorboký ihlan (pyramída) vyrobený z diamantu. Osi protiľahlých stien ihlanu zvierajú uhol  $136^\circ$ . Vzhľadom k tomu, že podstavu ihlanu tvorí štvorec, má pôdorys vzniknutého

odtlačku v materiálu tvar štvorca. K určení tvrdosti sa zmeria uhlopriečka odtlačku  $d$ . Vickersova mikrotvrdosť sa tak podľa normy vypočíta zo vzťahu:

$$VHN = \frac{1}{g} \times \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (9)$$

Kde  $F$  je hodnota maximálneho zaťaženia, dosiahnutého behom testu v  $N$ ,  $d$  je veľkosť uhlopriečky v  $mm$  a konštanta  $\frac{1}{g} = \frac{1}{9,80665} = 0,102 [m^{-1} \cdot s^2]$ . Vzťah môžeme upraviť:

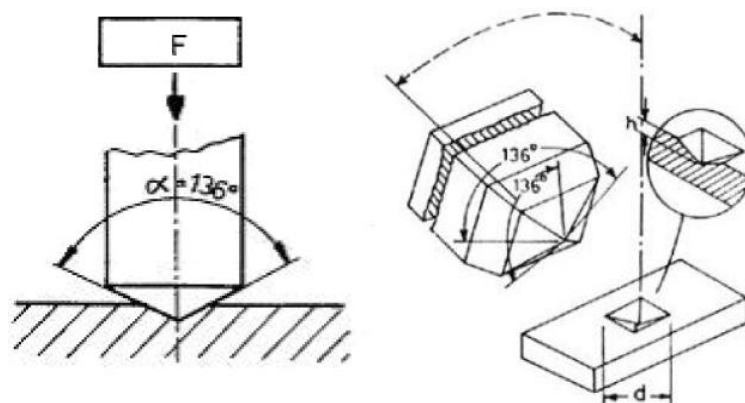
$$VHN = 0,1891 \times \frac{F}{d^2} \quad (10)$$

Vickersova tvrdosť je v  $[kg \cdot mm^{-2}]$ . Vickersova tvrdosť často označovaná ako Vickersovo číslo tvrdosti (Vickers Hardness Number – VHN) a jednotky sa označujú ako HV.

Avšak v laboratórnych podmienkach a čiastočne aj v strojárenskej praxi sa pri skúške vynecháva konštanta  $1/g$ . Rozmer tvrdosti je potom  $[N \cdot mm^{-2}]$ , čo je  $[MPa]$ . Vzťah môžeme upraviť na tvar:

$$H_v = 1,854 \times \frac{F}{d^2} \quad (11)$$

I keď má Vickersova skúška veľa výhod, meranie je zaťažené chybami spôsobenými vlastnosťami meraného materiálu alebo testovacím zariadením. Skúška sa napríklad nehodí na meranie s veľkou mierou povrchovej hrubosti a silnou heterogénnou štruktúrou povrchu.[4]

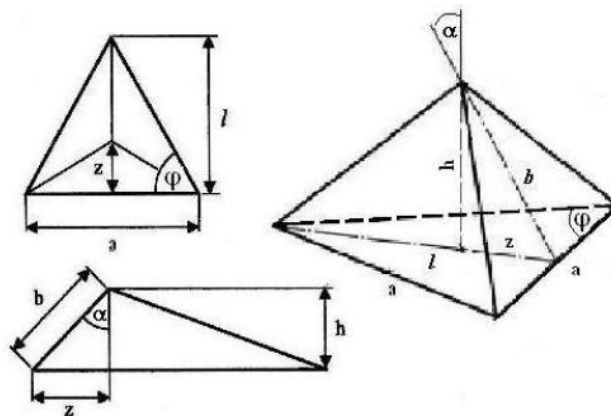


Obr. 7 Skúška mikrotvrdoosti podľa Vickerse [4]



#### 4.1.2 Skúška mikrotvrlosti podľa Berkoviča

Berkovičov trojstenný indentor bol navrhnutý v roku 1951. Priebeh a princíp indentačnej skúšky sa od Vickersova testu nijak nelíšia. Hlavným dôvodom uvedenia nového indentoru boli problémy s výrobou štvorbokého ihlanu. Vďaka svojmu tvaru je ihlan počas svojho pracovného namáhania menej citlivý na nárazy a neopatrné zachádzanie. V súčasnej dobe je Berkovičov indentor bežne používaný v nanoindentačných skúškach. Pôvodný „štandardný“ Berkovičov indentor bol navrhnutý tak, aby bol rovnaký pomer plochy stien ihlanu k jeho výške ako v prípade Vickersova ihlanu. Tomu u trojstenného ihlanu odpovedá uhol  $65,03^\circ$  medzi bočnými stenami a výškou ihlanu.



Obr. 8 Schéma pravidelného trojbokého ihlanu –Berkovičov indentor [4]

Hodnota mikrotvrlosti pre Berkovičov indentor s uhlom  $65,03^\circ$ , vyjadrená ako pomer veľkosti zaťaženia a plochy je:

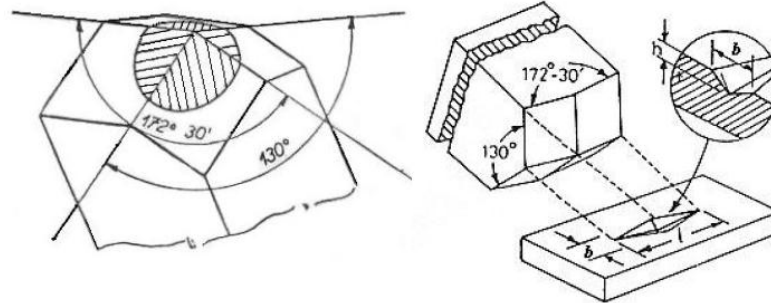
$$H_{CH} = 1570 \times \frac{W}{l^2} \quad (12)$$

Kde  $W$  je veľkosť zaťaženia ihlanu v kg a  $l$  je výška trojuholníka odmeraná na odtlačku. Index CH pochádza z pôvodného značenia mikrotvrlosti, pretože v staršej literatúre je skúška známa ako skúška mikrotvrlosti podľa Chruščova a Berkoviča.

#### 4.1.3 Skúška mikrotvrlosti podľa Knoop

V roku 1939 bol vyvinutý indentor unikátneho tvaru, ktorý je v súčasnosti celosvetovo známi ako Knoopov indentor. Knoopov indentor bol vyvinutý špeciálne pre vtlačovanej skúšky s nízkym zaťažením za účelom hodnotenia mikrotvrlosti tenkých plechov a krehkých materiálov. V súčasnosti má veľké uplatnenie v oblasti určovania lomenej húževnatosti keramiky. Knoopov indentor má tvar štvorstenného diamantového ihlanu, kto-

rého odtlačky majú tvar kosoobdĺžnika. Protiľahlé hrany zvierajú uhol  $175,5^\circ$  a  $130^\circ$ . Pomer dĺžok vedľajšej a hlavnej uhlopriečky je 1:7,11 a pomer dĺžok hlavnej uhlopriečky k hĺbke odtlačku je 30:1. Názorne je geometrie Knoopova indentoru znázornená na obr. 9.



Obr. 9 Geometrie Knoopova indentoru [4]

Knoopovo číslo tvrdosti je definované ako pomer pôsobiaceho zaťaženia na indentor a veľkosť nezotavené projektové plochy:

$$KHN = \frac{F}{A_p} \approx \frac{W}{l^2 \times C} \quad (13)$$

Kde  $F$  je pôsobiace zaťaženie v [N],  $A_p$  je projektová plocha v [mm],  $W$  znamená záťaž v [kg],  $l$  veľkosť nameranej dlhšej uhlopriečky v [mm] a  $C$  je geometrická konštanta, ktorá súvisí s geometriou indentoru. Knoopov indentor sa s výhodou používa na zistenie tvrdosti obzvlášť na tvrdých a teda krehkých materiáloch, pretože na rozdiel od Vickersovho a Brinellovho indentoru môžeme dĺžku hlavnej uhlopriečky ľahko odmerať.

#### 4.1.4 Inštrumentovaná vnikajúca skúška tvrdosti – DSI

Jedným z hlavných dôvodov pre vznik novej indentačnej techniky bola snaha o zistenie mechanických vlastnostiach tenkých vrstiev. Tradičné skúšky mikrotvrdosti resp. prístroje neboli schopné vytvoriť tak malé zaťaženie, aby nebol samotnou indetáciou ovplyvnení aj substrát, na ktorom bola vrstva nanosená. Požiadavky boli, aby celková hĺbka odtlačku bola rovná 10% z celkovej hĺbky vrstvy. A pokiaľ sa vytvoril odtlačok podľa daného požiadavku, nebolo možné jeho rozmery v klasickom tj. optickom mikroskope presne odmerať. Rozmery odtlačku sa museli premerať elektrónovým mikroskopom, čo prácu predlžovalo a komplikovalo, určovanie mikro, resp. ultramikrotvrdosti\* sa stávalo nepohodlným.

---

\*V súčasnosti hovoríme výhradne o nanoindentaci tj. nanotvrdosti

Metoda DSI (Depth Sensing Indentation) v preklade inštrumentovaná vnikajúca skúška tvrdosti má svoje začiatky v sedemdesiatich rokoch 20. storočia (Bulychev a Alekin). Základné vylepšenie metodológie, analýzy a všetky dokumenty urobili až Oliver a Pharr na začiatku osemdesiatich rokov. Princípom metódy je, že merací prístroj zaznamenáva súčasne okamžitú zmenu hĺbky prieniku indentoru do skúmaného materiálu v závislosti na plynulom náraste/poklese zaťaženia v priebehu celého zaťažovaného a odľahčovaného procesu. Grafickým spracovaním hodnôt vzniká charakteristická indentačná krivka zaťaženie - hĺbka odtlačku. Vďaka možnosti napojenia meracieho prístroja na PC sú priebehy skúšok hneď zaznamenávané súčasne s vyhodnotením niektorých materiálových parametrov.

Číselná hodnota tvrdosti sa obecné definuje ako podiel pôsobiacej maximálnej veľkosti sily  $F_{\max}$  a zostatkové konštantné plochy odtlačku  $A_s$ , matematicky vyjadrené:  $H = \frac{F_{\max}}{A_s}$ .

### Indentačné krivky

Hlavným cieľom indentačných mikro- a nanotechník je určenie mikro a nanotvrdosti a súčasne elastického modulu skúšobného vzorku, zaznamenávaný priebeh hodnôt pôsobiaceho zaťaženia na indentor a hĺbky prieniku indentoru. Experimentálne výsledky sa získavajú, keď pôsobiace zaťaženie narastá zo svojej nuly do svojho maxima a potom z maximálnej hodnoty naspäť do nuly. Ak sa indentované vzorky plasticky deformujú, zostáva v ich povrchu trvalý odtlačok. Veľkosť vzniknutého odtlačku je príliš malá na presné meranie optickými technikami, tak ako je tomu u konvenčných skúškach tvrdosti. Pri odľahčovaní dochádza k tzv. zotavovaniu odtlačku t.j. materiál sa snaží dostať do svojho pôvodného tvaru uvoľnením elastických deformácií. U kovu však k zotaveniu nikdy nedôjde v plnej miere, pretože vznikli už plastické deformácie. Analýza počiatočnej časti elastickej relaxácie v priebehu odľahčovania tak umožňuje určiť elastický modul skúmaného materiálu.

Metoda DSI sa v praxi používa na širokom a rozmanitom množstve materiáloch od mäkkých polymérov až ku tvrdým uhlíkovým diamantom podobným vrstvám. Inými slovami odozva meraného materiálu na indentáciu je hlavným činiteľom, ktorý ovplyvňuje tvar indentačnej krivky. Tvar indentačnej krivky neslúži iba k výpočtu tvrdosti a modulu pruž-

nosti, ale je zdrojom veľmi dôležitých informácií, ktoré sa prejavujú náhodným nespojitým priebehom napríklad fázová transformácia trhliny.

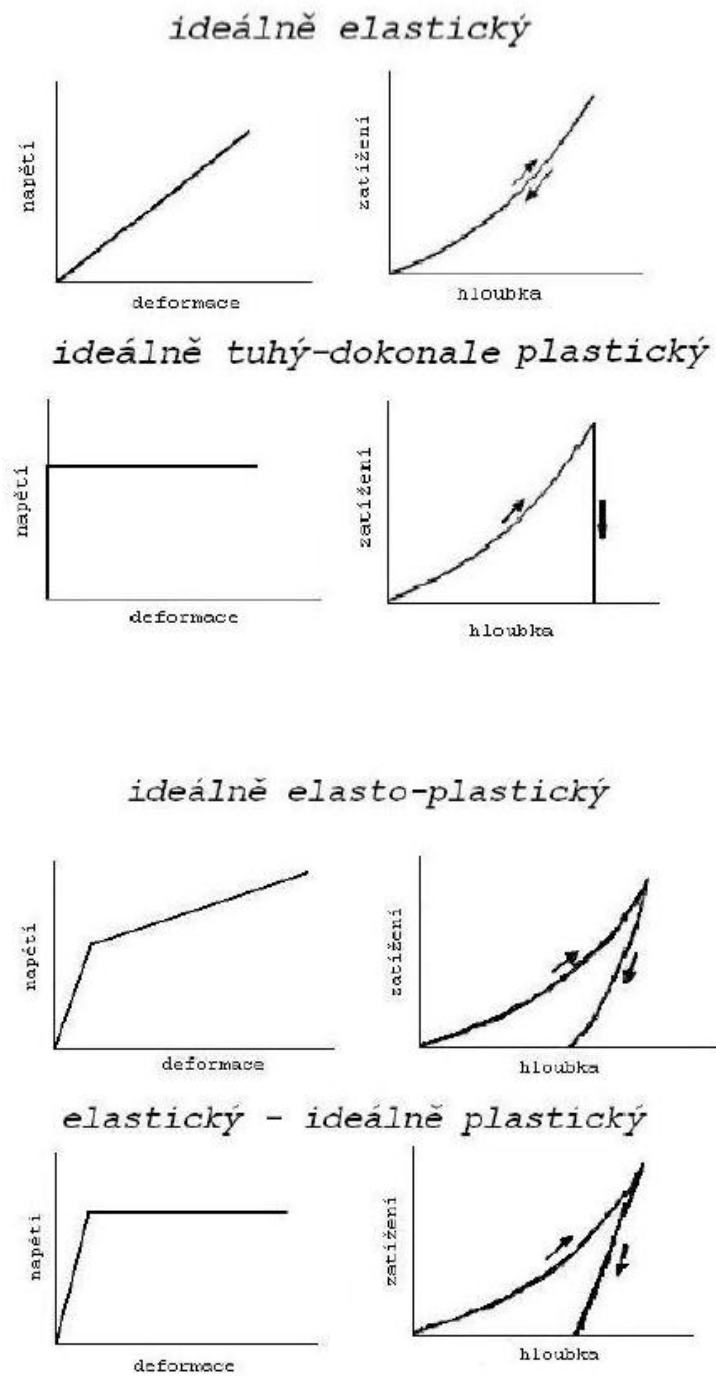
Obecne je nutné si uvedomiť, že materiály môžeme rozdeliť do štyroch skupín reakcií na vonkajšie silové pôsobenie:

- Elastické
- Elasticko-plastické
- Plastické
- Viskoelastické

V prípade čistej elastickej odozvy na intencie nenastáva žiadna plastická deformácia, tj. žiadny viditeľný zostatkový odtlačok. Napätie, ktoré indenter indukuje vo vzorku sa uloží ako elastická deformačná energia, ktorá sa v priebehu odľahčovania úplne uvoľní. Výsledkom je, že zaťažovaná a odľahčovaná krivka spolu vzájomne splývajú.

U materiálu iba plastického počas intencie nedochádza k elastickej deformácii. Ak vo vnútri vzorku nedošlo k rozvoju elastickej deformácie v priebehu zaťažovania, je výsledkom celého indentačného cyklu zaťaženie/odľahčenie odtlačku, ktorého hĺbka odpovedá hĺbke pri maximálne zaťaženom indentore.

Väčšina materiálov hlavne strojárenských, reaguje na vonkajšie zaťaženie elasto - plasticky a ich indentačné krivky tak tvoria stred medzi indentačnými krivkami, ktoré vytvárajú predchádzajúce dve skupiny materiálov. Zaťažujúca krivka elasto - plastického materiálu je určená jak elastickou, tak plastickou deformáciou indentovaného materiálu.



Obr. 10 Porovnanie odozvy materiálu na jednoosom a viacosom namáhaní [4]

Je nutné poznamenať, že zatiaľ neexistuje teória, ktorá by presne popisovala proces indentácie do elasticko-plastického materiálu. Analytické riešenia vedú k zložitým nelineárnym rovniciam s množstvom parametrov, popisujúcich chovanie materiálu, za pomoci metódy konečných prvkov (FEM). [4]

## 4.2 Mikrotvrdomery

K určovaniu mikrotvrdosti sa používajú špeciálne prístroje – mikrotvrdomery. Väčšinou sú všetky mikrotvrdomery zahraničného pôvodu, len málo sa stretávame s domácimi prototypy.

Podľa prevedenia môžu byť tieto prístroje rozdelené do dvoch skupín:

- Mikrotvrdomery, u ktorých je diamant vsadený priamo v objekte mikroskopu. Prístroje tohto druhu sú väčšinou prevádzané ako doplnok metalografických mikroskopov.
- Mikrotvrdomery s diamantom v samostatnom nástavci mimo optiku sú väčšinou konštruované ako prístroje pracujúce samostatne.

U oboch skupín prístrojov môžu byť k zaťažovaniu použité buď závažie s prevodom, alebo bez prevodu, alebo pružiny (listové alebo špirálové). Veľký počet mikrotvrdomerov je zostrojených pre používanie v kombinácii s normálnym metalografickým mikroskopom (mikrotvrdomer Hannemanov, Bergsmanov, Cookov, atď.). [5]

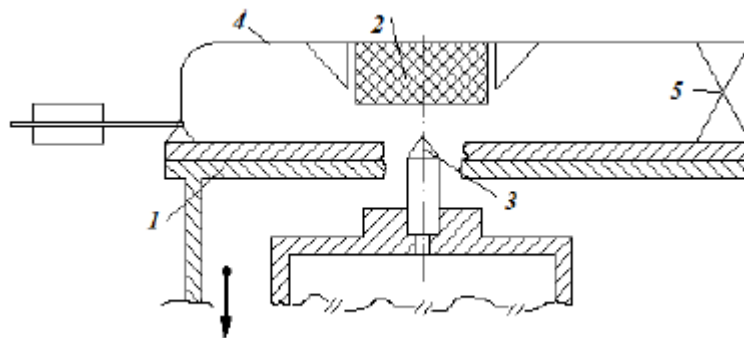
- **Hannemanov mikrotvrdomer** – patrí medzi najpoužívanejšie a najstaršie metódy pre hodnotenie mikrotvrdosti štruktúry kovov. Prevádza sa na metalografických mikroskopoch Neophot alebo Epityp. Skladá sa z dvoch častí: z nástavca obsahujúceho skúšobné teleso i zaťažovaný mechanizmus a z meracieho okulára. Nástavec sa vkladá do lôžka v telese mikroskopu obdobne ako normálny metalografický objektív.



Obr. 11 Nástavec a merací okulár mikrotvrdomeru Hanneman

Základom tohto mikrotvrdomeru je spojenie Vickersovho ihlanu k určovaniu tvrdosti s čelnou šošovkou metalografického objektívu. [1,5]

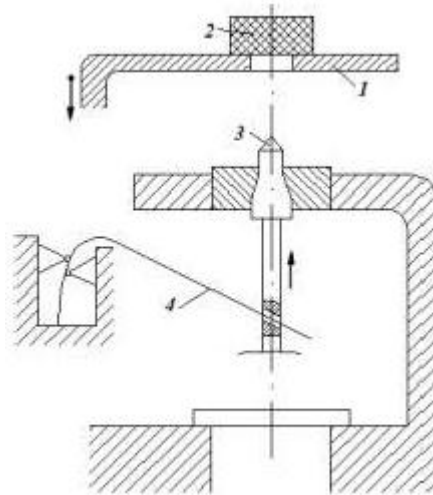
- **Bergsmannov mikrotvrdomer** – slúži v kombinácii s metalografickým mikroskopom, nemá však diamant vsadený priamo do objektívu. Nástavec s diamantom sa nasadzuje do mikroskopu tak, že je diamant presne v optickej ose a po vytvorení odtlačku sa nástavec vymení za objektív. Prístroj pracuje so zaťažením 1 až 200 g.



Obr. 12 Schéma Bergsmannovho mikrotvrdomeru

(1-stolek, 2-merané teleso, 3-skúšobné teleso(diamant), 4-páka, 5-kontakty elektrického obvodu)

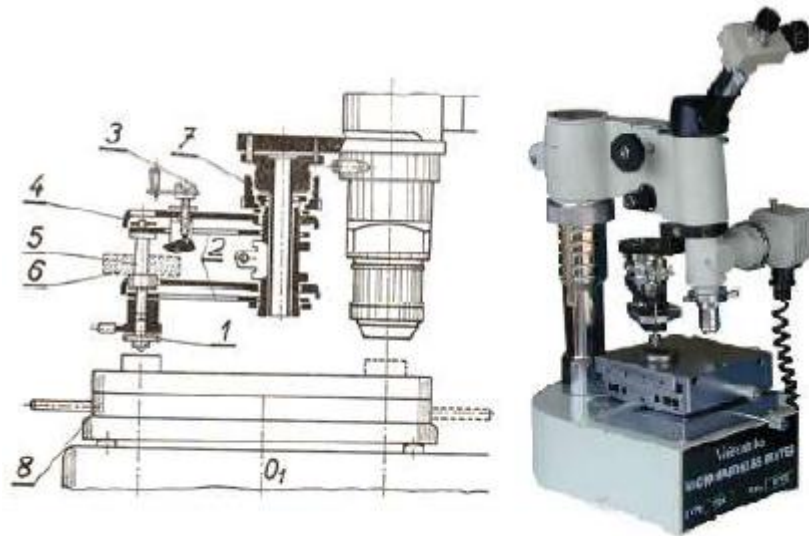
- **Girschingov mikrotvrdomer** – odtlačok sa vyvodzuje posuvom stola 1 so skúšobným vzorkom 2 proti hrotu diamantového ihlanu 3. Deformáciou pružiny 4 pri tomto pohybe sa vyvodzuje stála vtlačovaná sila. Zaťaženie môžeme meniť výmenou listových pružín a to v rozsahu 10 až 1000g. Na podobnom princípe avšak s pružinami špirálovými pracujú mikrotvrdomery Eberhardov a Philipsov. [5]



Obr. 13 Schéma Girschingovho mikrotvrdomeru

(1-stolek mikrotvrdomeru, 2-skúšané teleso, 3-diamantový ihlan, 4-listová pružina)

- **Mikrotvrdomer PMT – 3** – je konštruovaný ako samostatný prístroj. Skúšobné teleso má opäť tvar štvorbokého ihlanu s vrcholovým uhlom  $136^\circ$ . [5]

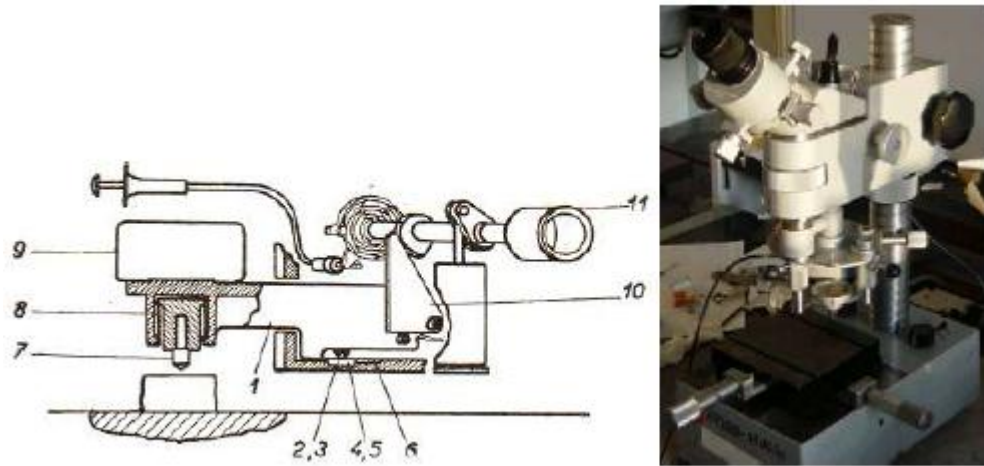


Obr. 14 Schéma mikrotvrdomeru PMT – 3

(1-nástavec s diamantom, 2-listové pružiny, 3-aretačný mechanizmus, 4-pevná konzola, 5-vertikálny držiak, 6-závažie, 7-stavacie matice, 8-otočný stôl)



- **Mikrotrvdomer Durimet** – má podobnú konštrukciu ako predchádzajúci typ PMT-3. Podobá sa celkovou koncepciou, líši sa v prevedení zaťažovaného mechanizmu.



*Obr. 15 Schéma a pohľad na mikrotrvdomer Durimet*

*(1-dvojramenná páka, 2,3-ocelové hroty, 4,5-operné dosky, 6-listová pružina, 7-diamantový hrot, 8-ocelové drôty, 9-závažie, 10-trojuholníková doska, 11-hlavica k ručnému odťahaniu)*

Prístroj Durimet je určený pre skúšky mikrotrvrdosti podľa Vickerse a Knoopu a môžeme na ňom prevádzkať aj vrypové skúšky. Rozsah zaťaženia je od 15 do 500 g.[5]

## **II. PRAKTICKÁ ČASŤ**

## 5 CIEĽ DIPLOMOVEJ PRÁCE

Cieľom diplomovej práce bolo stanoviť mikrotvrdosť povrchovej vrstvy metódou DSI na MICRO-COMBI TESTERU. Mikrotvrdosť bola stanovená u ožarovaného a neožarovaného polyméru PA 6. Do polymérneho materiálu bolo pridávané sieťujúce činidlo v množstve 1 – 6%. Následne boli skúšobné telesá ožarované beta žiarením dávkami 66, 99 a 132 kGy.

Ďalším cieľom diplomovej práce bolo stanoviť mikrotvrdosť u PP. U skúšky bol používaný materiál PP plnený a neplnený. Následne boli telesá ožarované beta žiarením dávkami 30, 45, 60, a 90 kGy.

V diplomovej práci je hlavným cieľom zistiť, ako ovplyvňuje povrchovú vrstvu materiálu PA 6 sieťujúce činidlo v množstve 1 – 6% a následné ožarovanie beta žiarením dávkami 66, 99 a 132 kGy. Ďalším materiálom u ktorého bolo prevádzané meranie mikrotvrdosti je materiál PP plnený 25% sklenených vlákien a PP neplnený. Vlastnosti PP boli modifikované beta žiarením dávkami 30, 45, 60 a 90 kGy.

### *Postup pri vypracovaní diplomovej práce:*

- Vypracovanie literárnej štúdie na danú tému
- Príprava vzorkou
- Realizácia merania mikrotvrdosti
- Vyhodnotenie nameraných výsledkov.

## 6 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Pre experimentálnu časť bol vybraný polymérny materiál PA6 a PP. Do PA6 materiálu bolo pridávané sieťujúce činidlo v množstve 1-6%, zatiaľ čo materiál PP (plnený a neplnený) bol dodaný už s pridaným sieťovaným činidlom. Následne bol polymér PA6 ožiarený beta žiarením dávkami 66, 99 a 132 kGy a polymér PP bol ožiarený beta žiarením dávkami 30, 45, 60 a 90 kGy. U oboch radiačne modifikovaných polymérov (PA a PP) bol sledovaný vplyv ožarovania na zmenu mikrotvrdoosti.

### 6.1 Materiál PA všeobecne

Polyamidy patria medzi dôležitú skupinu polymérnych materiálov, ktoré sa vyznačujú vynikajúcimi mechanickými vlastnosťami. Všetky polyamidy obsahujú v molekule amidové skupiny  $-NHCO-$ , ktoré môžu byť usporiadané tromi rôznymi spôsobmi. Podľa tohto existujú tri základné typy polyamidov:

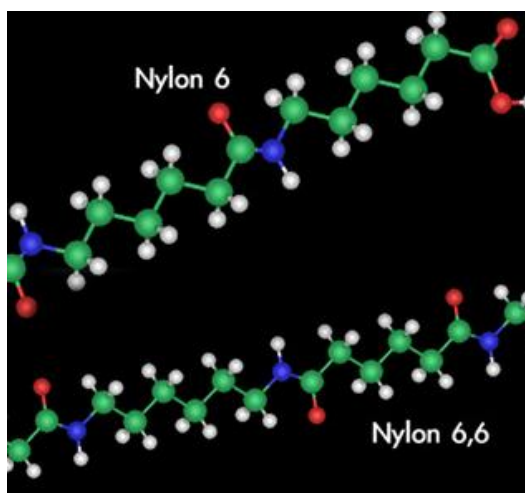
- Pravidelne usporiadané so štruktúrou  
 $-NHCO-CONH-NHCO-CONH-NHCO-CONH-NHCO-$
- A zmiešaný typ  
 $-NHCO-CONH-NHCO-NHCO-$

Pravidelné usporiadanie lineárnych makromolekúl dáva predpoklad pre vysoký stupeň kryštalizácie polyamidov. Podiel kryštalickej fázy môže dosahovať až 60%.

Hustota takého polyméru sa pohybuje v rozmedzí  $1100 - 1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Vďaka svojim vynikajúcim mechanickým vlastnostiam, hlavne pevnosti v ťahu, ohybu, pomerne značnou tvrdosťou sa stali vyhľadávanými konštrukčnými plastmi napriek tomu, že cenovo nemôžu konkurovať hlavným masovo vyrábaným polymérom. Svojou vysokou odolnosťou voči oderu polyamidy prekonávajú väčšinou doposiaľ známych polymérov.

Rôzne varianty výrobných metód umožňujú pripravovať polyamidy extrémne odlišných vlastností. Od mäkkých ohybných materiálov po typy tvrdé a tuhé, typy amorfné, s nízkym a vysokým podielom kryštalickej fázy, polyamidy transparentné, prírodné aj farebné, polyamidy veľmi, stredne aj slabo navlhavé, viac alebo menej rázu vzdorné, vláknotvorné, oderuvzdorné, elastomérne typy, polyamidy antistatické, samo zhasínajúce, vystužené, so zvýšenou odolnosťou k termooxidácií, korózii, poveternostnému starnutiu atď.

Spoločné vlastnosti pre všetky typy polyamidov sú: ľahká spracovateľnosť, relatívne vysoká húževnatosť, veľmi dobrá odolnosť proti opotrebeniu a únave, odolnosť voči olejom a pohonným hmotám. Nevýhodou je relatívne vysoká absorpcia vody a relatívne nízka odolnosť k poveternostnému starnutiu (spolupôsobenie slnečného žiarenia, kyslíku, vlhkosti a kyselín reagujúcich exhalácií). Účinkom termooxidačného starnutia dochádza predovšetkým k poklesu ťažnosti a rázovej húževnatosti. Tieto nevýhodné vlastnosti je však možné zmeniť vhodnými stabilizátormi. Polyamidy majú obdobné dobré elektrické vlastnosti ako väčšina ostatných plastov. Izolačný odpor, permitivita a stratový činiteľ je u všetkých typov polyamidov rovnaký. Všetky tieto vlastnosti sa však zhoršujú t.j. dosahujú vyšších hodnôt s obsahom vlhkosti. [7]



Obr. 16 Základné typy polyamidu [7]

### 6.1.1 Použitý materiál PA 6

Materiál, ktorý bol ožarovaný a následne testovaný je od firmy EPSAN PLASTIK SAN.VE TIC.LTD.STI.

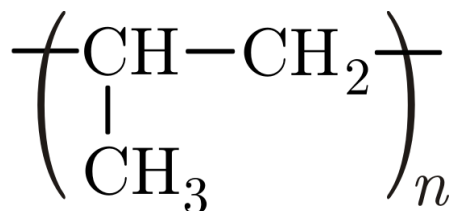
Názov materiálu je EPLAMID 6 GFR30 FRV0 NATURAL, jedná sa o prírodný polyamid 6, ktorý je plnený sklenenými vláknami, do ktorého bol následne pridaný retardér horenia. Ďalšie vlastnosti materiálu sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 3 Vlastnosti polyamidu 6 [8]

Materiálové vlastnosti Polyamidu 6		
<b>Mechanické vlastnosti</b>	Modul pružnosti v tahu	8500 - 9000N/mm <sup>2</sup>
	Sila pri pretrhnutí	145 - 155N/mm <sup>2</sup>
	Pomerné predĺženie	3 - 4 %
	Vrubová húževnatosť	14 - 15 KJ/m <sup>2</sup>
<b>Fyzikálne vlastnosti</b>	Hustota	1,5 - 1,52g/m <sup>3</sup>
	Tvrdosť	80 - 85 D
<b>Horľavosť</b>	Samozhasivosť (1,6mm)	VO
	Horúci drôt (2mm)	960°C
<b>Tepelné vlastnosti</b>	Bod tavenia	215 - 225°C
	Tepelná vodivosť	0,23W/K.m
	Min. teplota použitia	-40°C

## 6.2 Materiál PP všeobecne

Polypropylén je druhým významným zástupcom polyolefinov a jeho svetová spotreba stále stúpa. Vyrába sa polymeráciou propylénu.



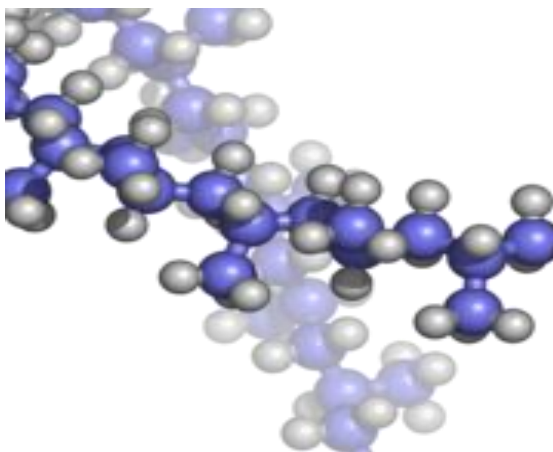
Obr. 17 Štruktúrny vzorec PP [9]

Je to kryštalický polymér o stupni kryštalinity 60 až 70%. Vyrába sa prakticky výlučne koordinačnou polymeráciou na špeciálnych katalyzátoroch (tzv. ZN katalyzátory podľa vynálezcov Zieglera a Natty). Výsledkom sú vysokomolekulárne polyméry s veľmi pravidelnou štruktúrou danou usporiadaním substituentov CH<sub>3</sub>. Najväčší význam má tzv. PP izotaktický, kde metylové skupiny sú všetky usporiadané k jednej strane myslenej roviny preložené základným reťazcom. Pri polymerácii PP vzniká vždy aj určitý podiel polyméru ataktického, kde skupiny CH<sub>3</sub> sú orientované náhodne. V komerčných produktoch sa požaduje tzv. index izotakticity vyšší než 90%.

PP má nízku hustotu pri 23°C 0,90 až 0,92g.cm<sup>-3</sup>. Vzhľadom k svojej kryštalinite je nepriehľadný. Teplota tavenia čistého isotaktického PP je 176°C, obchodné typy 160 -

170°C. Podobne ako PE vykazuje PP výborné elektro - izolačné vlastnosti a chemickú odolnosť.

PP môžeme použiť na rôzne výrobky, kde sa požaduje tuhosť, mechanická pevnosť a dobré elektro - izolačné vlastnosti. V automobilovom priemysle sú to najrôznejšie vstrekované dielce, prístrojové dosky, ventilátory apod. V spotrebnom priemysle časti domácich spotrebičov, kufre, hračky, záhradný nábytok a pod. V chemickom priemysle trubky pre kanalizačné odpady. Fólie sa široko uplatňujú v obalovej technike pri balení potravín. [10]



Obr. 18 Priestorový model PP [9]

### 6.2.1 Použitý materiál PP

Názov materiálu je Polypropylén PP PTS-Crealen EP-2300L1-M800 (neplnený) a polypropylén PTS-Crealen EP8G5HS\*M0083 (plnený 25% sklenými vláknami) vo forme granúl. Obidva typy materiálu obsahujú už špeciálne siet'ujúce činidlo TAIC, ktoré má umožniť následné zosiet'ovanie ionizačným žiarením.

Pripravené skúšobné telieska boli ožiarené dávkou 30, 45, 60 a 90 kGy vo firme BGS Beta-Gamma Service GmbH & Co. KG, Industriestraße 9, Saal am Donau, Deutschland.

Tab. 4 Vlastnosti polypropylénu PP [8]

Materiálové vlastnosti Polypropylénu PP		
<b>Mechanické vlastnosti</b>	Modul pružnosti v tahu	1450MPa
	Tvrdosť(Rockwell)	70D
	Tvrdosť (Brinell)	H358/30
	Vrubová húževnatosť	5 KJ/m <sup>2</sup>
<b>Fyzikálne vlastnosti</b>	Hustota	0,903g/cm <sup>3</sup>
	Teplota vzplanutia	350-360°C
<b>Elektrické vlastnosti</b>	Permitivita pri 50Hz	2,3
	Povrchový odpor	1,00E+14 Ohm
<b>Tepelné vlastnosti</b>	Bod tavenia	160 - 170°C
	Tepelná vodivosť	0,22W/K.m
	Max. teplota krátkodobá	140°

## 6.2.2 Sieťujúce činidlo

### Materiál PA

Použitie činidlo, ktoré bolo primiešané do Polyamidu 6 v rôznych dávkach od 1% až po 6% má názov Masterbach BETALINK®-Master IC/W65PA6.

Dané sieťujúce činidlo je v špeciálnych prípadoch prípravy pri pokojovej teplote, čo má za následok prevenciu voči tepelnej degradácii prísad. Činidlo svojím zloženým predchádza klasickým problémom s tekutými či už práškovými prísadami. Produkt je vhodný pre technológie vstrekovania ale aj pre extrúziívne účely.

Hlavné výhody BETALINK činidla v porovnaní s inými tekutými alebo práškovými prísadami:

- Žiadna prašnosť pri spracovávaní a pri suchom mixovaní s polymérmi
- Kompatibilita s PA 6 a PA 6.6
- Žiadne vyparovanie činidla v násypke
- Redukcia riziku sklznutia v plniacej zóne extrudéru.

BETALINK by nemal byť predušovaný a mal by byť pridávaný do polymérov (PA 6) až potom ako je materiál vysušený.

Pridávaním Betalinku-Master IC/W65PA6 sa redukuje viskozita. Vo veľa prípadoch teplota tavenia môže byť taktiež znížená.

Podmienky skladovania:



- Životnosť nepoužitého balenia pri stanovených podmienkach skladovania je 1 rok
- Skladovanie by malo byť uskutočňované v chladných, suchých a tmavých miestach. [7]

### **Materiál PP**

Pre materiál PP (polypropylén) je použité sieťujúce činidlo s označením TAIC. Toto činidlo umožní pri ožarovaní základného materiálu, aby sa jednotlivé voľné radikály polypropylénu chemicky naviazali na dané činidlo TAIC a vytvoril sa tak určitý stupeň kryštalizácie (ten je závislý na dávke ožiarovania).

Sieťujúce činidlo TAIC *Triallylisocyanulat* (vo forme granúl) bolo implementované do polypropylénu v množstve 3-5 objemových percent. Celý proces prípravy robila firma PTS Plastic Technologie Service, Hautschenmühle 3, Adelshofen, Deutschland.

### **6.2.3 Ožiarovanie vzorkov**

#### **Materiál PA**

Vzhľadom nato, že samotné ožiarovanie vzorkov je nutné vykonať špeciálnym zariadeným, boli vzorky odvezené do Nemeckej firmy „BETA-GAMA-SERVICE“. Vzorky boli ožiarované tromi dávkami a to: 66, 99 a 132 kGy..

#### **Materiál PP**

Taktiež u materiálu PP boli skúšobné telieska ožiarované dávkou 30, 45, 60 a 90 kGy vo firme BGS „BETA-GAMA-SERVICE.“

### **6.2.4 Jednotky používané pri ožarovaní**

U radiačného sieťovania, určuje v prvom rade dávka ožiarovania požadovanej zmeny vlastností, tzn. množstvo absorbovanej energie žiarenia na mernú jednotku hmoty.

Dávka intenzity žiarenia (dosis) = absorbovanej energii žiarenia/hmotnosť

Jednotka intenzity je (gray) [Gy], predtým to bol (rad).

$$1\text{Gy} = 1\text{joule/kg} = 100 \text{ rad}$$

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

Energia žiarenia absorbovaná výrobkom za časovú jednotku a vzťahnutá na hmotnosť je dávkovaná intenzita žiarenia.

$$1\text{Gy/s} = 1\text{Watt/kg} = 0,36 \text{ Mrad/h}$$

Penetrácia (hĺbka prenikania) vysoko energetických elektrónov popripade gama žiarenie je závislé na ich energií. Merná jednotka je joule [J], predtým [eV].

$$1\text{MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$$

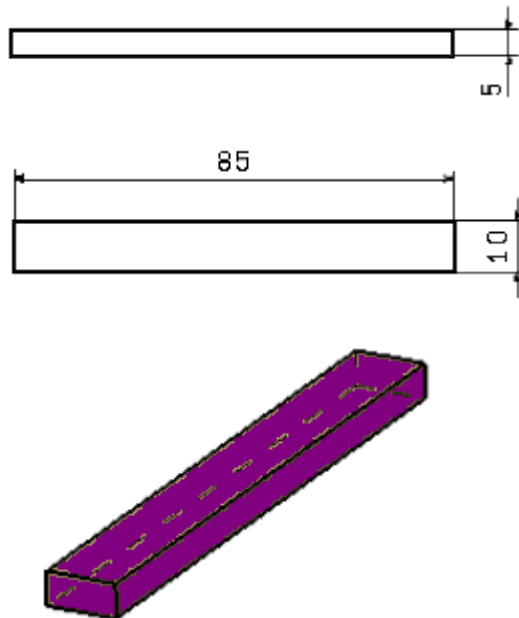
Výkon zdroja rádioaktívneho žiarenia je charakterizovaný jeho aktivitou. Jednotka pre aktivitu je Becquerel [Bq], predtým: Curie [Ci]. [7]

$$1\text{Bq} = 1 \text{ rozpad/s}$$

$$1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq.}$$

### Rozmery a tvar teliesok:

Tvar a rozmer skúšobného telesa odpovedá pre skúšku vrubovej húževnatosti a jeho rozmery sú uvedené na Obr.19.



Obr. 19 Tvar a rozmery skúšobných telies

## 7 SKÚŠKA MIKROTVRDOSTI

Meranie mikrotvrdoosti bolo prevádzané na MICRO - COMBI TESTERU firmy CSM. Aplikované zaťaženie bolo zvolené 1N pri výdrži 90s. Zaťažujúca a odťažujúca rýchlosť bola 2N/min. Meranie bolo prevádzané na každom vzorku vždy desať krát.



Obr. 20 Prístroj CSM

### Parametre MICRO - COMBI TESTERU:

Parameter	Predpísané parametre
Zariadenie pre mikroindentáciu s riadiacou jednotkou	
Rozsah zaťaženia	0,01–30N s minimálnym rozlíšením 0,3mN
Riadené záťaž	automatické
Rozsah hĺbok indentácie	0 - 200 $\mu$ m s minimálnym rozlíšením 0,3nm
Indentory	Vickers, Knoop, Berkovich – diamantové s kalibračným certifikátom.
Meranie uhlopriečok odtlačku	elektronicky
Kalibračná sada pre indentory	Certifikovaný oceľový vzorok pre tvrdosť Certifikovaný vzorok pre kalibráciu vzdialenosti

Polohovací systém	X, Y rozsah merania 120x20mm, rozlíšenie 0,01mm, automatické Z priblíženie, opakovateľnosť, reprodukovateľnosť, linearita
Univerzálny držiak skúšobných vzorkov	áno
Ovládanie prístroja	Meranie umožňujúce záznam zaťaženia verzus hĺbka, hĺbka verzus čas pri konštantnom zaťažení
Software na spracovanie hodnôt a flexibilné programované meranie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automaticky prevádzané experimenty na viacerých vzorkách (viacbodové, maticové zadanie pozícií indentácie)</li> <li>• Možnosť užívateľské kalibrácie systému, softwarová kalibrácia plochy hrotu v nadväznosti na merané dáta.</li> <li>• Export nameraných dát do Microsoft Excel</li> <li>• Automatický výpočet tvrdosti a modulu pružnosti</li> <li>• Štatistická analýza nameraných dát (priemer, chyba merania atď.)</li> <li>• Uloženie nespracovaných nameraných dát pre neskoršie spracovanie.</li> </ul>
Video mikroskop	Optické objektívy 5x a 50x pre zväčšenie (200x a 2000x) s digitálnou kamerou (USB 2.0), s výstupom na monitor, video software
Stôl s antivibračným systémom	Vertikálne a horizontálne tlmenie
PC zostava + monitor	

Zariadenie pre vrypový test s riadiacou jednotkou	
Rozsah zaťaženia	0 – 30N s minimálnym rozlíšením 0,1mN
Riadenie záťaže	automatické
Rozsah trecej sily	0 – 30N s minimálnou rozlíšiteľnosťou 0.1mN
Riadenie trecej sily	automatické

Rozsah hĺbok vrypu	0 - 1000 $\mu$ m s minimálnym rozlíšením 0.3nm
Maximálna dĺžka vrypu	120mm
Vrypová rýchlosť	0.4 – 600mm/min
Indentory	Vickers, Rockwell, Berkovich – diamantové s kalibračným certifikátom.
Senzor akustickej emisie	áno
Kalibračná sada pre indentory	Certifikovaný oceľový vzorok pre tvrdosť Certifikovaný vzorok pre kalibráciu vzdialenosti
Polohovací systém	X, Y rozsah merania 120x20mm, rozlíšenie 0,25 $\mu$ m, automatické Z priblíženie, opakovateľnosť, reprodukovateľnosť, linearita
Univerzálny držiak skúšobných vzorkov	áno
Ovládanie prístroja	Meranie umožňujúce záznam zaťaženia verzus hĺbka, koeficient trenia $\mu$ medzi sondou a povrchom, akustická emisia, pozorovanie vrypu
Software na spracovanie dát a flexibilné programovanie merania	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatické prevádzanie experimentu na viac vzorkoch (viacbodové, maticové zadanie pozícií vrypu)</li> <li>• Možnosť užívateľskej kalibrácie systému, softwarová kalibrácia plochy hrotu v nadväznosti na merané dáta.</li> <li>• Export nameraných dát do Microsoft Excel</li> <li>• Automatický výpočet medzných síl</li> <li>• Štatistická analýza nameraných dát (priemer, chyba merania atď.)</li> <li>• Uloženie nespracovaných nameraných dát pre neskoršie spracovanie</li> </ul>
Video mikroskop	Optické objektívy 5x a 50x pre zväčšenie (200x a 2000x) s digitálnou kamerou (USB 2.0), s výstupom na monitor, video software
Stôl s antivibračným systémom	Vertikálne a horizontálne tlmenie
PC zostava + monitor	



*Obr. 21 Popis prístroja CSM*

1 – Meracia hlava

2 – Univerzálny držiak vzorkov

3 – X posun

4 – Y posun

5 – Z posun

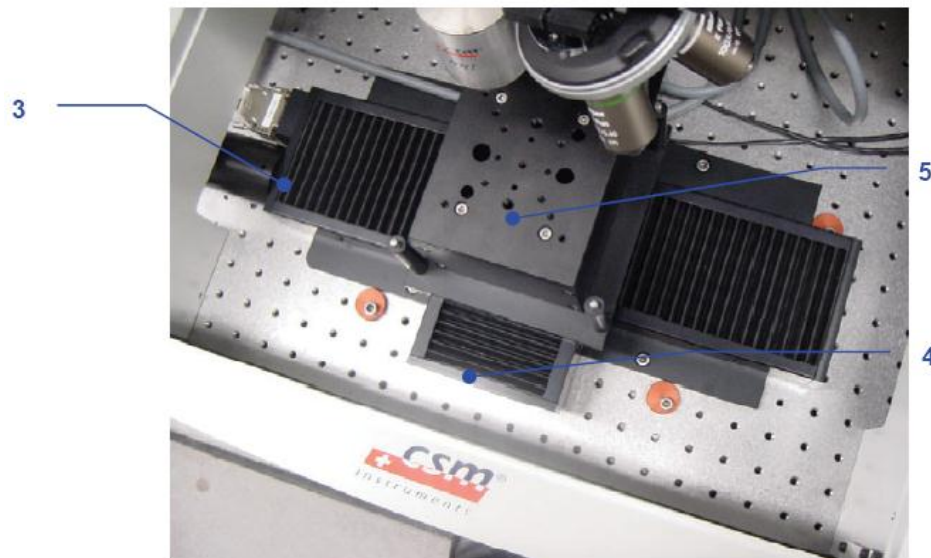
6 – Optický mikroskop

7 – Modulová hlava ( vertikálne nastaviteľný )

8 – Anti – vibračný stĺp

9 – Optický senzor

10 – Horný kryt stola

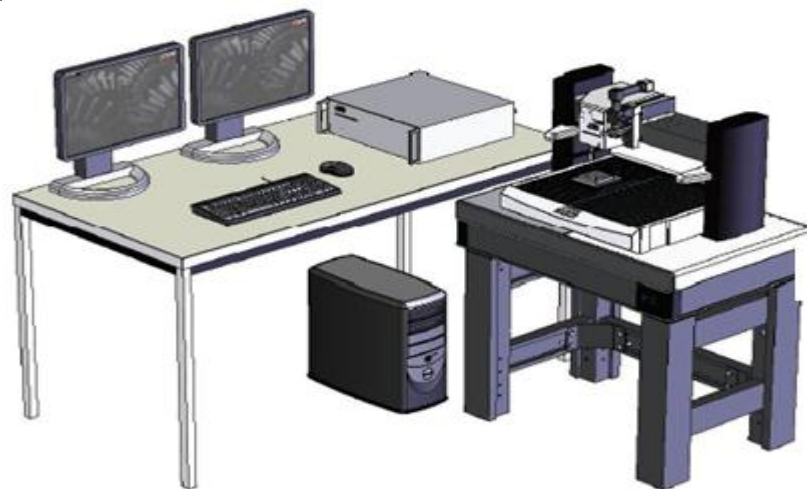


Obr. 22 Popis přístroja CSM 2

**Rozměry:**

Tab. 5 Rozměry přístroja

č.p.	Název	Rozměry
1	Anti-vibrační stůl	510 x 430 mm, 542 mm výška, 240 kg
2	Anti-vibrační stůl+ skříň	1020x805 mm, 1700 mm výška, 300 kg
3	PC	190 x 500 mm, 420 mm výška, 10 Kg
4	Plochá obrazovka 2x	380 x 210 mm, 460 mm výška, 7,5 Kg
5	Políčka s řídiacou jednotkou a PC	790 x 500 mm, 1100 mm výška, 60 Kg
6	Řídiaca jednotka	450 x 550 mm, 170 mm výška, 10 Kg
7	Betónový podklad	950 x 700 x 100 mm váha 140 Kg
8	Polymérne kusy	100 x 350 mm (x5)



Obr. 23 Pracoviško pre meranie mikrotvrdości

## 7.1 Hodnoty získané metódou DSI

Metódou DSI (Depth Sensing Indentation) v preklade inštrumentovaná vnikajúca skúška tvrdosti má svoje počiatky v sedemdesiatich rokoch 20 storočia. Princípom metódy je, že merací prístroj zaznamenáva okamžitú zmenu hĺbky prieniku indentoru do skúšaného materiálu. Vďaka možnosti napojenia meracieho prístroja na PC sú priebehy skúšok hneď zaznamenané súčasne s vyhodnotením niektorých materiálových parametrov. [4]

Najčastejšie sa používa vťahovaná tvrdosť  $H_{IT}$ , ktorá vyjadruje odpor k trvalej deformácii alebo poškodenia a je definovaná:

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} = \frac{F_{max}}{24,50 \times h_p^2} \quad (14)$$

Kde  $A_p$  označuje priemet kontaktnej plochy indentoru vo vzdialenosti  $h_p$  od hrotu,  $h_p$  je hĺbka kontaktu vnikajúceho telesa so skúšobným telesom pri  $F_{max}$ .

Kombinovaný alebo redukovaný modul  $E^*$  je definovaný rovnicou:

$$E^* = \frac{\sqrt{\pi} \times S}{2 \times \sqrt{A_p}} \quad (15)$$

Kde  $S$  je vťahovaná tuhosť. V prípade použitia diamantového indentoru je  $E_i = 1140 \text{ GPa}$  a  $\nu_i = 0,07$ . Ako výsledok dostávame vťahovaný modul, ktorý je definovaný ako:

$$E_{IT} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (16)$$

Správny vzťah pre výpočet vťahovaného modulu je:

$$E_{IT} = \frac{1}{\frac{1-\nu_i^2}{E^*} - \frac{1-\nu^2}{E_i}} \quad (17)$$

Počas vyhodnocovania nameraných hodnôt boli použité tieto vzťahy:

Aritmetický priemer: 
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (18)$$

Smerodajná odchýlka: 
$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \bar{x}^2} \quad (19)$$

Stredná kvadratická chyba: 
$$\delta = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (20)$$



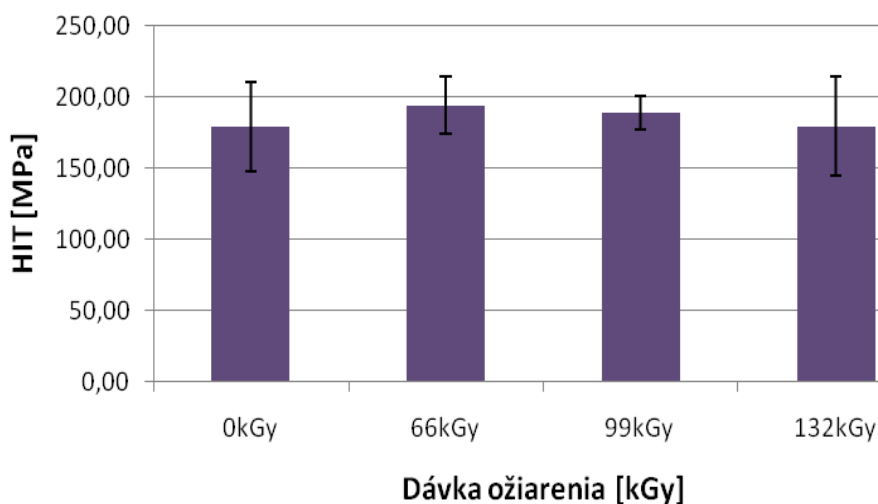
## 7.2 Výsledky z merania mikrotvrlosti

### 7.2.1 Výsledky mikrotvrlosti materiálu PA

- PA 6 – 1% sieťujúceho činidla

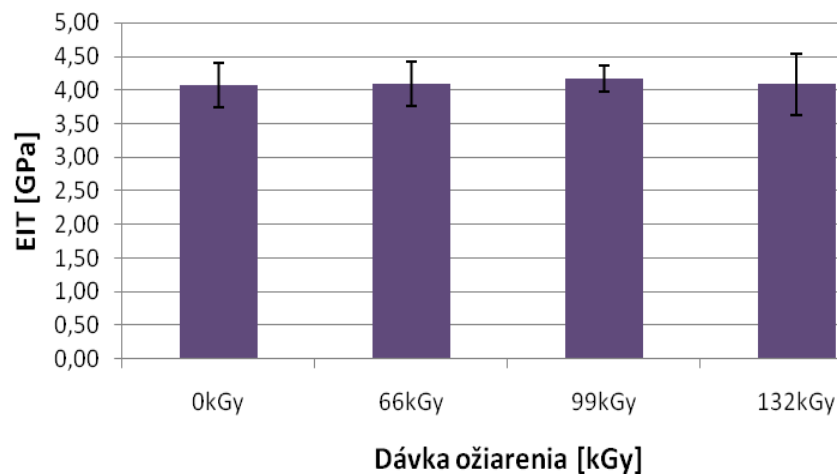
Tab. 6 Hodnoty PA 6 – 1% sieťujúceho činidla

	0kGy	66kGy	99kGy	132kGy
HIT [MPa]	179,11	194,47	189,52	179,41
EIT [GPa]	4,08	4,10	4,17	4,09
Er [GPa]	4,46	4,48	4,56	4,47
E* [GPa]	4,48	4,50	4,58	4,49
HV [Vickers]	16,91	18,36	17,89	16,93
CIT [%]	10,90	11,00	9,89	10,05
RIT [%]	-0,08	-0,07	-0,08	-0,07
hc [nm]	15328,20	14664,94	14805,60	15176,71
hp [nm]	12298,78	11682,97	11900,60	12048,55



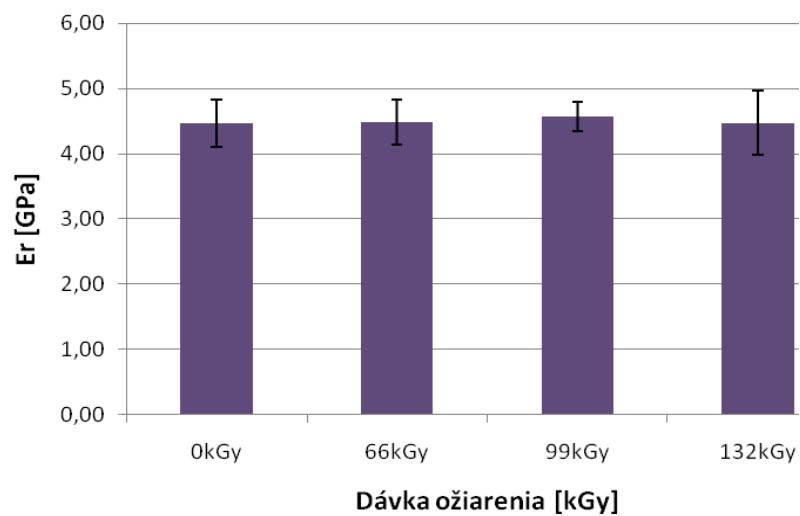
Obr. 24 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 1% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrlosti bola najväčšia hodnota vtlačovanej tvrdosti (HIT) zistená u dávky ožiarenia 66 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 132kGy (Obr.24, Tab.6).



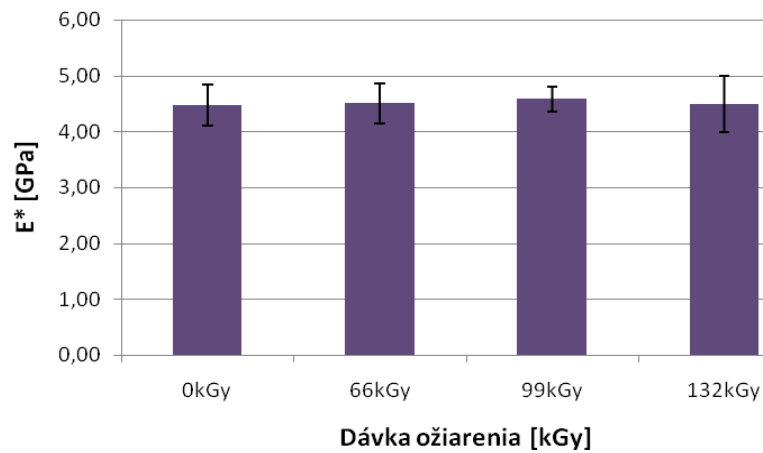
Obr. 25 Vtlačovaný modul pružnosti ( $EIT$ ) PA 6 – 1% sieťujúceho činidla

Z výsledkov merania mikrotvrdoosti bolo zistené, že najmenšia hodnota modulu ( $EIT$ ) bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy, zatiaľ čo najväčšia hodnota bola nameraná u dávky ožiarenia 99 kGy (Obr.25, Tab.6).



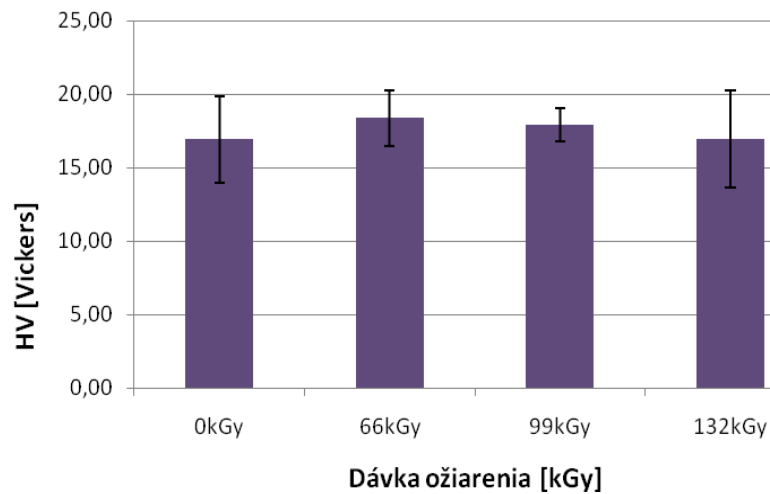
Obr. 26 Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PA – 1% sieťujúceho činidla

Najväčšia hodnota redukovaného modulu pružnosti ( $E_r$ ) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 99 kGy, naopak najmenšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy (Obr.26, Tab.6).



Obr. 27 Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 1% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdoosti komplexného modulu pružnosti ( $E^*$ ) bola najväčšia hodnota vtláčovanej tvrdosti zistená u dávky ožiarenia 99 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.27, Tab.6).



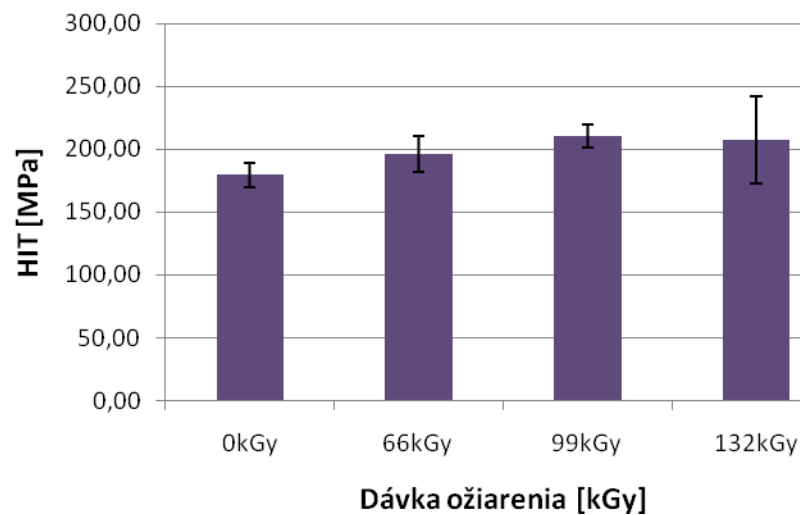
Obr. 28 Tvrdosť (HV) PA – 1% sieťujúceho činidla

Najmenšia hodnota tvrdosti (HV) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 0 kGy, naopak najväčšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 66 kGy (Obr.28, Tab.6).

- PA 6 – 2% sieťujúceho činidla

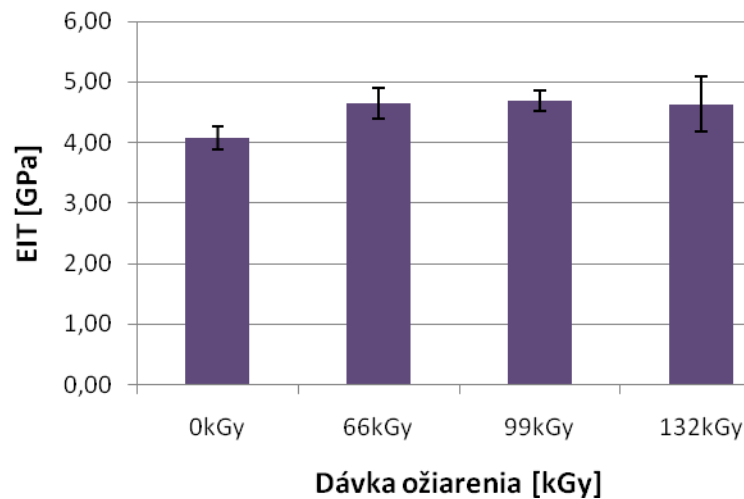
Tab. 7 Hodnoty PA 6 – 2% sieťujúceho činidla

	0kGy	66kGy	99kGy	132kGy
HIT [MPa]	179,11	196,14	210,61	207,14
EIT [GPa]	4,08	4,65	4,70	4,63
Er [GPa]	4,46	5,08	5,14	5,07
E* [GPa]	4,48	5,10	5,16	5,09
HV [Vickers]	16,91	18,51	19,88	19,55
CIT [%]	10,90	8,76	9,12	9,60
RIT [%]	-0,08	-0,09	-0,09	-0,08
hc [nm]	15328,20	14507,56	14005,42	14115,43
hp [nm]	12298,78	11539,09	11249,47	11388,97



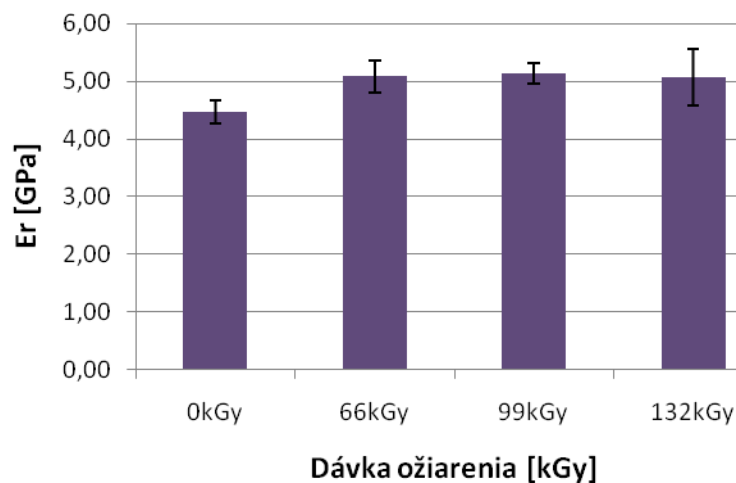
Obr. 29 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 2% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdoosti bola najväčšia hodnota vtlačovanej tvrdosti (HIT) zistená u dávky ožiarenia 99 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 66 kGy (Obr.29, Tab.7).



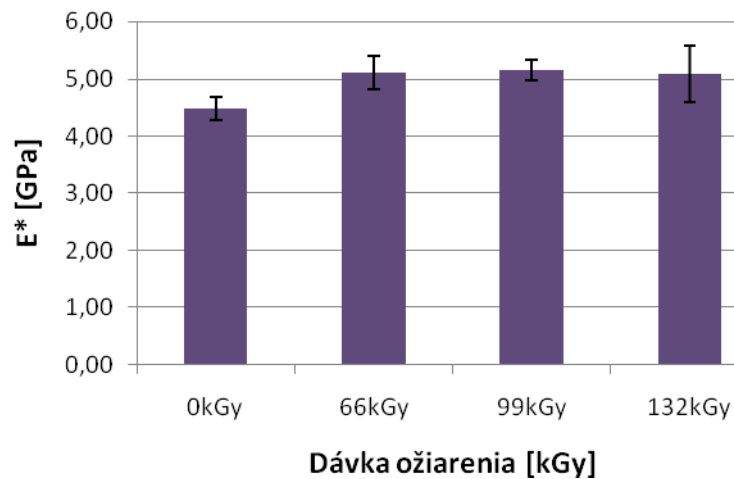
Obr. 30 Vlačovaný modul pružnosti ( $EIT$ ) PA 6 – 2% sieťujúceho činidla

Z výsledkov merania mikrotvrdoosti bolo zistené, že najmenšia hodnota modulu ( $EIT$ ) bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy, zatiaľ čo najväčšia hodnota bola nameraná u dávky ožiarenia 99 kGy (Obr.30, Tab.7).



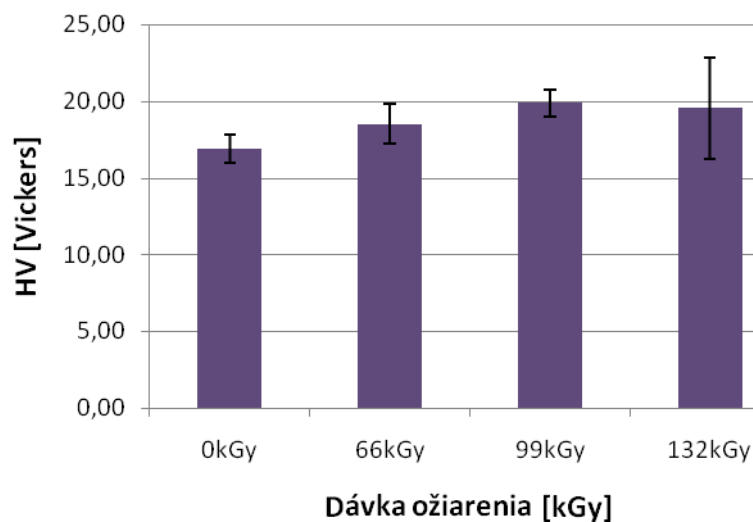
Obr. 31 Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PA – 2% sieťujúceho činidla

Najväčšia hodnota redukovaného modulu pružnosti ( $E_r$ ) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 99 kGy, naopak najmenšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy (Obr.31, Tab.7).



Obr. 32 Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 2% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdoosti komplexného modulu pružnosti ( $E^*$ ) bola najväčšia hodnota vtláčovanej tvrdoosti zistená u dávky ožiarenia 99 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.32, Tab.7).



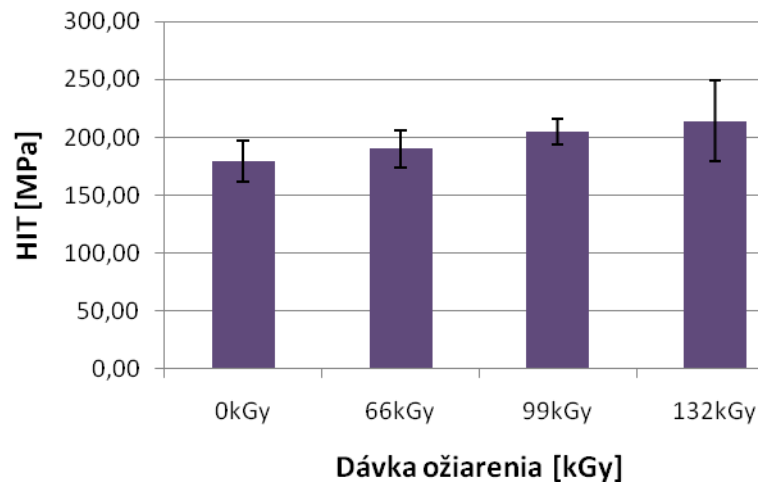
Obr. 33 Tvrdoosť (HV) PA – 2% sieťujúceho činidla

Najmenšia hodnota tvrdoosti (HV) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 0 kGy, naopak najväčšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 99 kGy (Obr.33, Tab.7).

- PA 6 – 3% sieťujúceho činidla

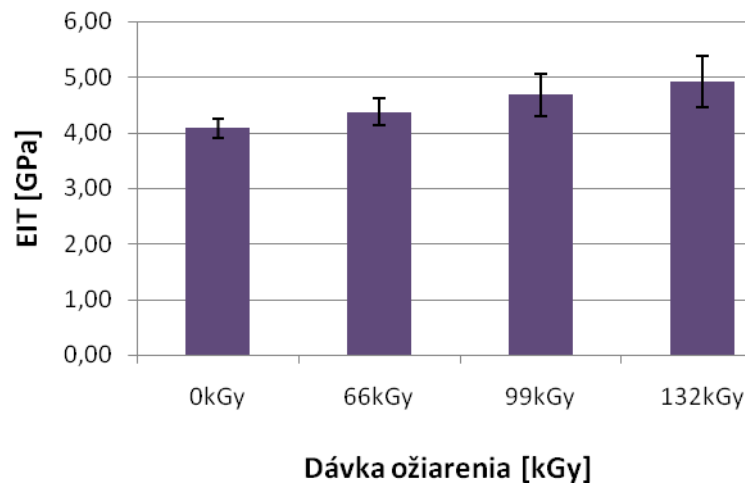
Tab. 8 Hodnoty PA 6 – 3% sieťujúceho činidla

	0kGy	66kGy	99kGy	132kGy
HIT [MPa]	179,11	190,20	204,64	213,84
EIT [GPa]	4,08	4,37	4,68	4,92
Er [GPa]	4,46	4,78	5,12	5,38
E* [GPa]	4,48	4,80	5,15	5,40
HV [Vickers]	16,91	17,95	19,32	20,18
CIT [%]	10,90	8,40	8,30	8,30
RIT [%]	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08
hc [nm]	15328,20	14775,13	14220,86	13901,13
hp [nm]	12298,78	11815,99	11458,08	11158,87



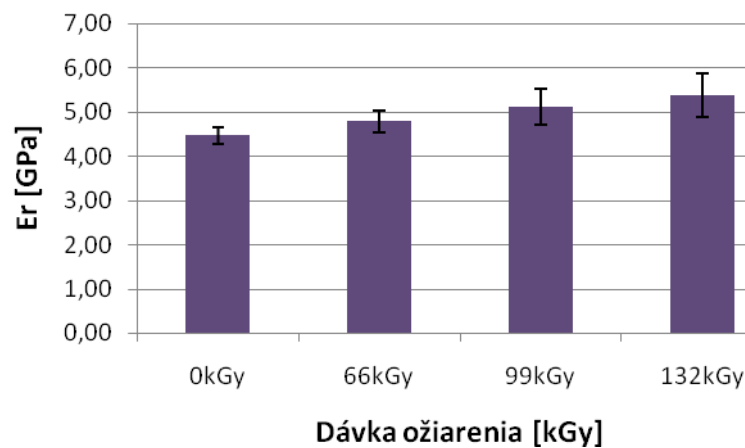
Obr. 34 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 3% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdoosti bola najväčšia hodnota vtlačovanej tvrdosti (HIT) zistená u dávky ožiarenia 132 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.34, Tab.8).



Obr. 35 Vtlačovaný modul pružnosti ( $EIT$ ) PA 6 – 3% sieťujúceho činidla

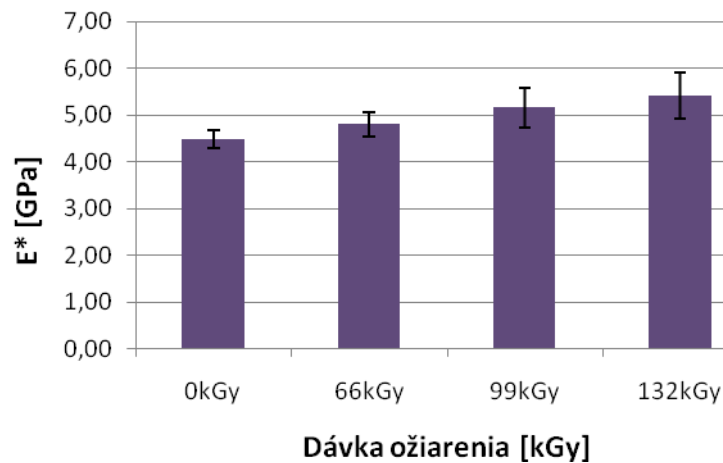
Z výsledkov merania mikrotvrdoosti bolo zistené, že najmenšia hodnota modulu ( $EIT$ ) bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy, zatiaľ čo najväčšia hodnota bola nameraná u dávky ožiarenia 132 kGy (Obr.35, Tab.8).



Obr. 36 Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PA – 3% sieťujúceho činidla

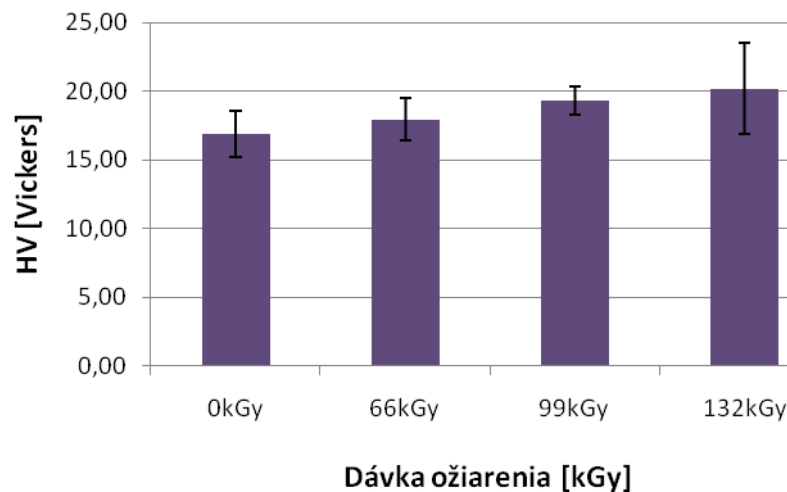
Najväčšia hodnota redukovaného modulu pružnosti ( $E_r$ ) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 132 kGy, naopak najmenšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy (Obr.36, Tab.8).





Obr. 37 Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 3% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdości komplexného modulu pružnosti ( $E^*$ ) bola najväčšia hodnota vtláčovanej tvrdosti zistená u dávky ožiarenia 132 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.37, Tab.8).



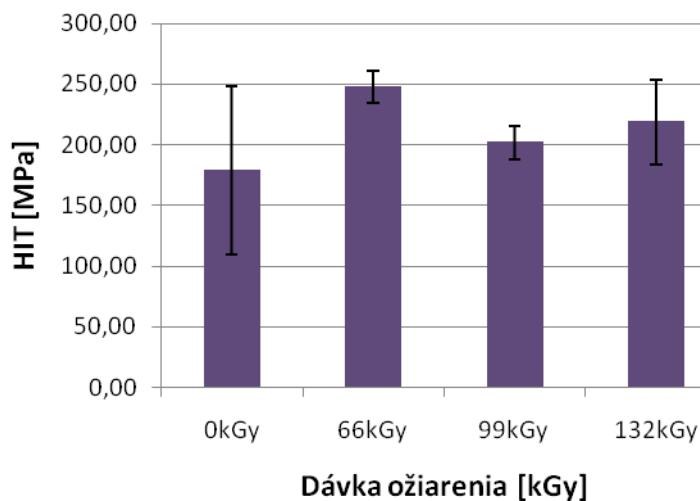
Obr. 38 Tvrdość (HV) PA – 3% sieťujúceho činidla

Najmenšia hodnota tvrdosti (HV) pri skúške mikrotvrdości bola nameraná u dávky ožiarenia 0 kGy, naopak najväčšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 132 kGy (Obr.38, Tab.8).

- PA 6 – 4% sieťujúceho činidla

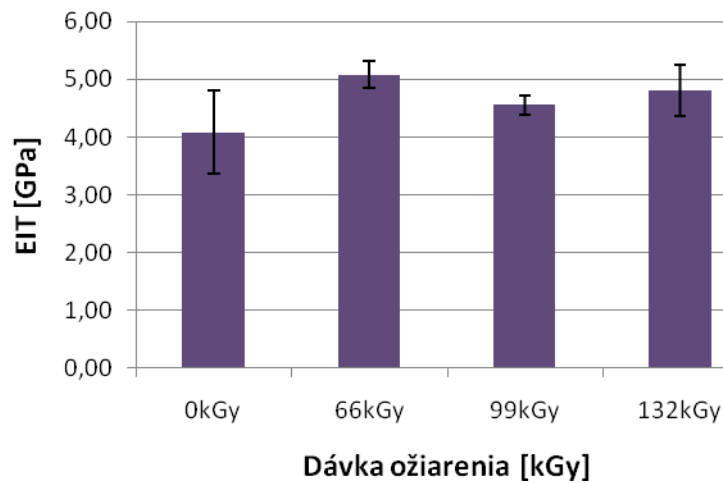
Tab. 9 Hodnoty PA 6 – 4% sieťujúceho činidla

	0kGy	66kGy	99kGy	132kGy
HIT [MPa]	179,11	247,54	202,15	218,94
EIT [GPa]	4,08	5,08	4,56	4,81
Er [GPa]	4,46	5,55	4,98	5,26
E* [GPa]	4,48	5,58	5,01	5,28
HV [Vickers]	16,91	23,36	19,08	20,67
CIT [%]	10,90	8,68	7,84	8,24
RIT [%]	-0,08	-0,09	-0,08	-0,08
hc [nm]	15328,20	13204,30	14311,27	13731,82
hp [nm]	12298,78	10399,85	11441,31	10800,78



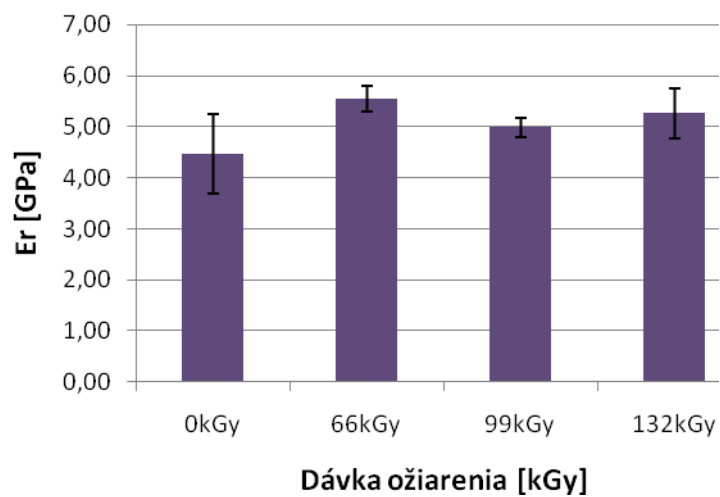
Obr. 39 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 4% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdoosti bola najväčšia hodnota vtlačovanej tvrdosti (*HIT*) zistená u dávky ožiarenia 66 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.39, Tab.9).



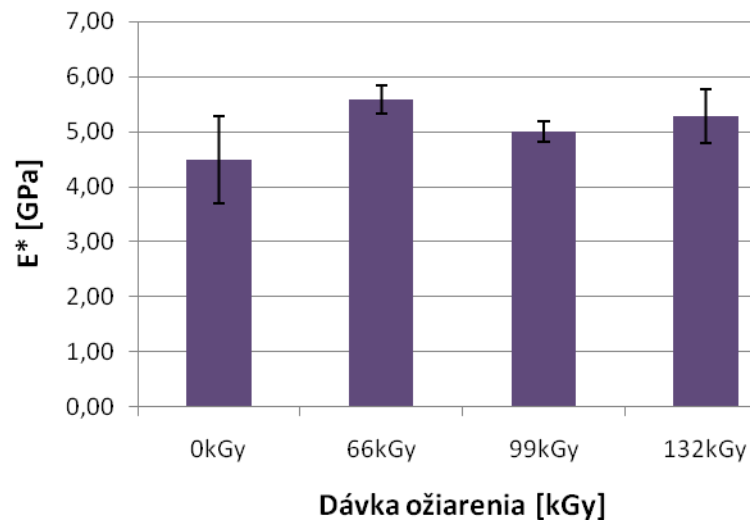
Obr. 40 Vtlačovaný modul pružnosti ( $EIT$ ) PA 6 – 4% sieťujúceho činidla

Z výsledkov merania mikrotvrdości bolo zistené, že najmenšia hodnota modulu ( $EIT$ ) bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy, zatiaľ čo najväčšia hodnota bola nameraná u dávky ožiarenia 66 kGy (Obr.40, Tab.9).



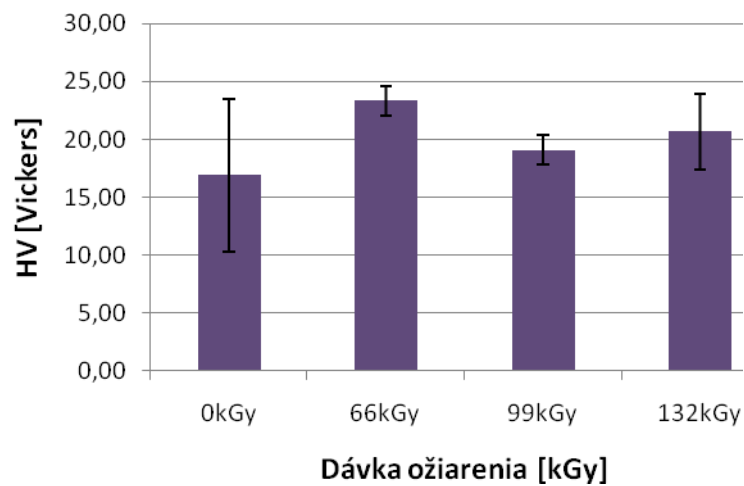
Obr. 41 Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PA – 4% sieťujúceho činidla

Najväčšia hodnota redukovaného modulu pružnosti ( $E_r$ ) pri skúške mikrotvrdości bola nameraná u dávky ožiarenia 66 kGy, naopak najmenšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy (Obr.41, Tab.9).



Obr. 42 Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 4% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdoosti komplexného modulu pružnosti ( $E^*$ ) bola najväčšia hodnota vtláčovanej tvrdoosti zistená u dávky ožiarenia 66 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.42, Tab.9).



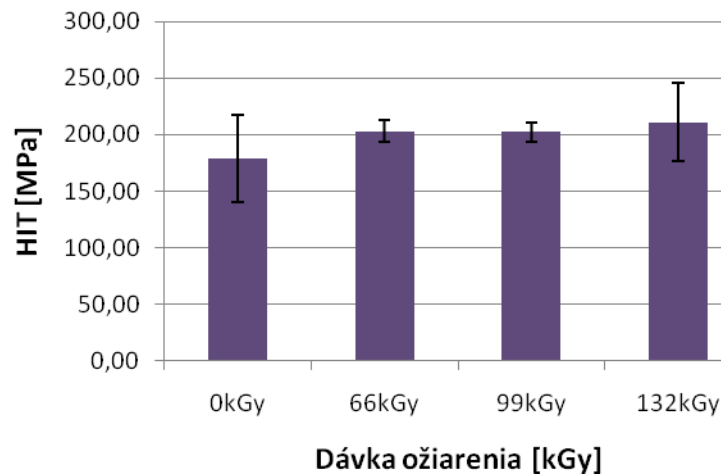
Obr. 43 Tvrdoosť (HV) PA – 4% sieťujúceho činidla

Najmenšia hodnota tvrdoosti (HV) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 0 kGy, naopak najväčšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 66 kGy (Obr.43, Tab.9).

- PA 6 – 5% sieťujúceho činidla

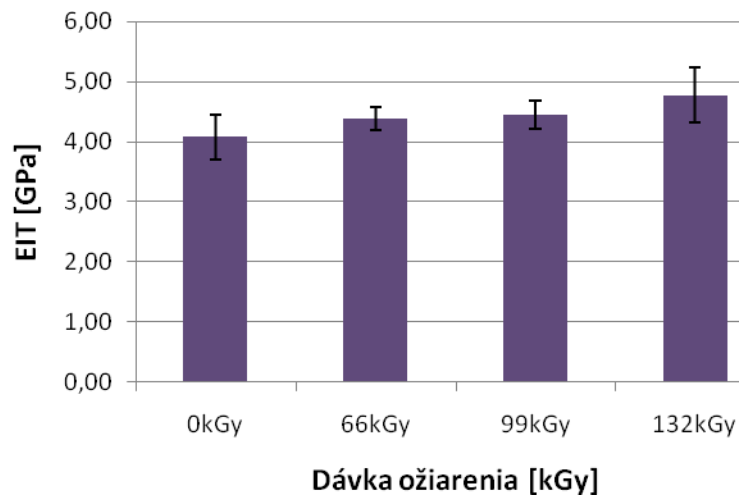
Tab. 10 Hodnoty PA 6 – 5% sieťujúceho činidla

	0kGy	66kGy	99kGy	132kGy
HIT [MPa]	179,11	203,17	202,31	210,97
EIT [GPa]	4,08	4,38	4,45	4,77
Er [GPa]	4,46	4,79	4,87	5,22
E* [GPa]	4,48	4,09	4,87	5,25
HV [Vickers]	16,91	19,18	19,10	19,91
CIT [%]	10,90	9,27	8,48	8,26
RIT [%]	-0,08	-0,07	-0,08	-0,08
hc [nm]	15328,20	14394,10	14289,50	13984,15
hp [nm]	12298,78	11483,96	11331,01	11074,73



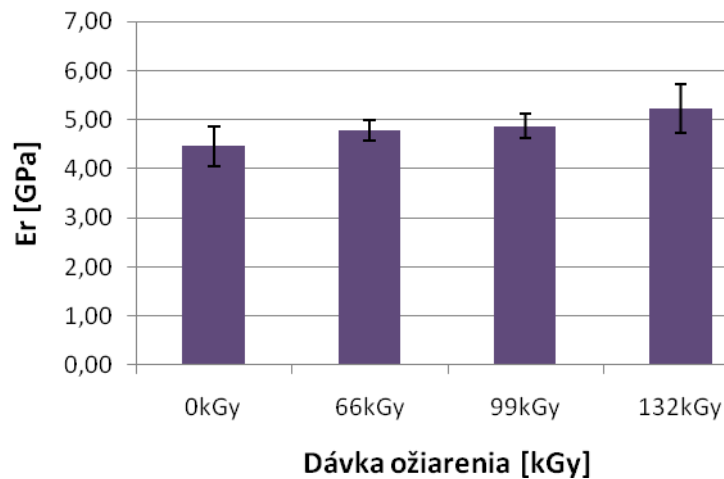
Obr. 44 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 5% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdosti bola najväčšia hodnota vtlačovanej tvrdosti (HIT) zistená u dávky ožiarenia 132 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.44, Tab.10).



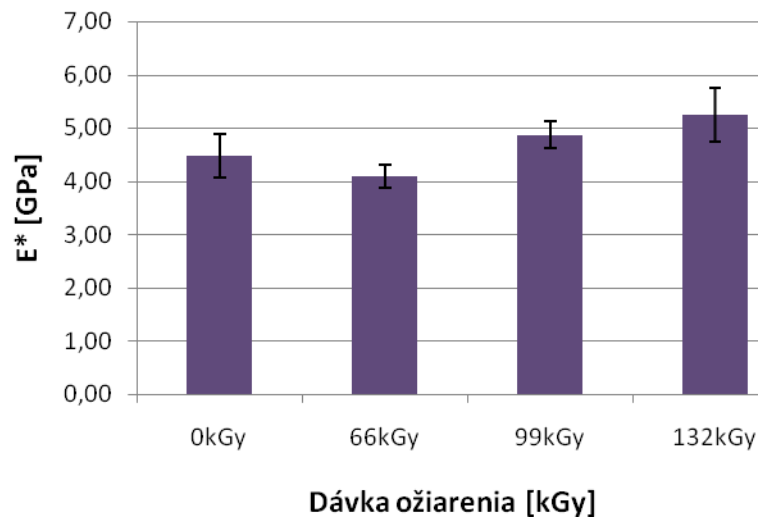
Obr. 45 Vtlačovaný modul pružnosti ( $EIT$ ) PA 6 – 5% sieťujúceho činidla

Z výsledkov merania mikrotvrdości bolo zistené, že najmenšia hodnota modulu ( $EIT$ ) bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy, zatiaľ čo najväčšia hodnota bola nameraná u dávky ožiarenia 132 kGy (Obr.45, Tab.10).



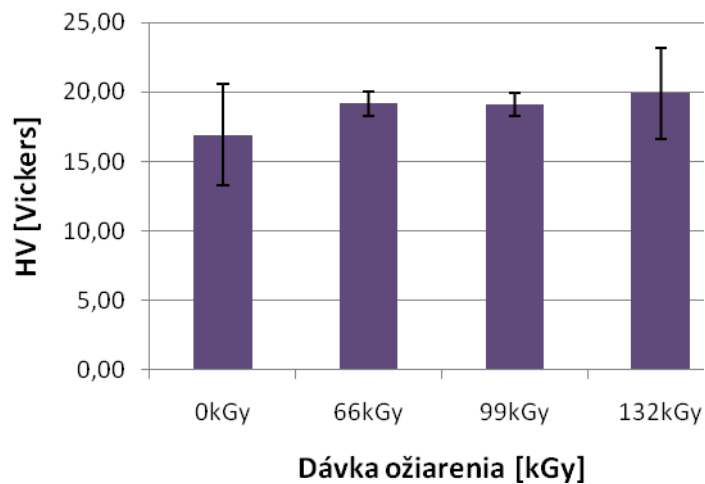
Obr. 46 Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PA – 5% sieťujúceho činidla

Najväčšia hodnota redukovaného modulu pružnosti ( $E_r$ ) pri skúške mikrotvrdości bola nameraná u dávky ožiarenia 132 kGy, naopak najmenšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy (Obr.46, Tab.10).



Obr. 47 Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 5% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdości komplexného modulu pružnosti ( $E^*$ ) bola najväčšia hodnota vtláčovanej tvrdosti zistená u dávky ožiarenia 132 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 66 kGy (Obr.47, Tab.10).



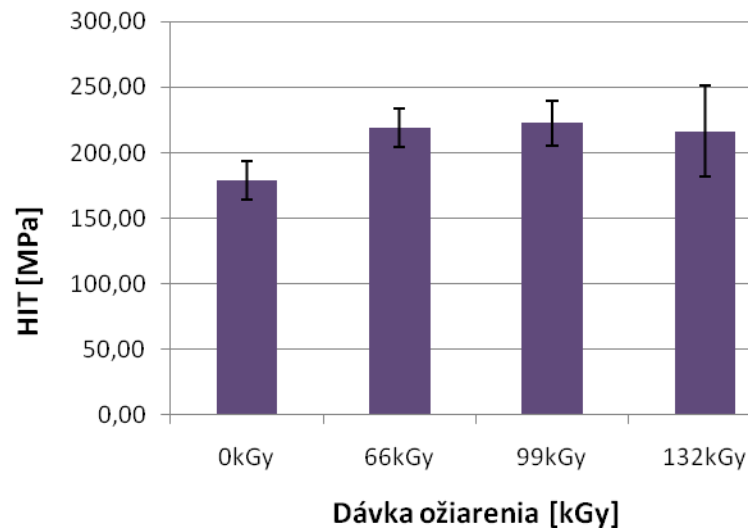
Obr. 48 Tvrdosť (HV) PA – 5% sieťujúceho činidla

Najmenšia hodnota tvrdosti (HV) pri skúške mikrotvrdości bola nameraná u dávky ožiarenia 0 kGy, naopak najväčšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 132 kGy (Obr.48, Tab.10).

- PA 6 – 6% sieťujúceho činidla

Tab. 11 Hodnoty PA 6 – 6% sieťujúceho činidla

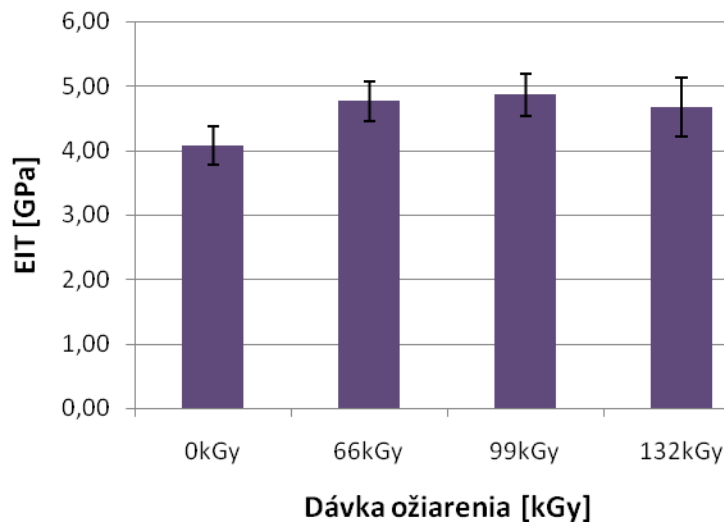
	0kGy	66kGy	99kGy	132kGy
HIT [MPa]	179,11	219,00	222,38	216,34
EIT [GPa]	4,08	4,77	4,86	4,67
Er [GPa]	4,46	5,21	5,31	5,11
E* [GPa]	4,48	5,24	5,34	5,14
HV [Vickers]	16,91	20,67	20,99	20,42
CIT [%]	10,90	7,81	8,09	8,37
RIT [%]	-0,08	-0,09	-0,09	-0,09
hc [nm]	15328,20	13756,88	13642,99	13840,99
hp [nm]	12298,78	10905,92	10829,44	10950,87



Obr. 49 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 6% sieťujúceho činidla

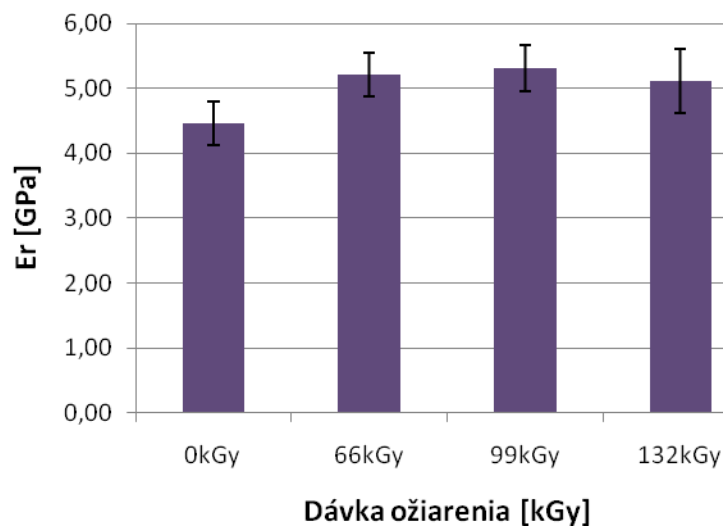
Pri skúške mikrotvrdoosti bola najväčšia hodnota vtlačovanej tvrdosti (HIT) zistená u dávky ožiarenia 99 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.49, Tab.11).





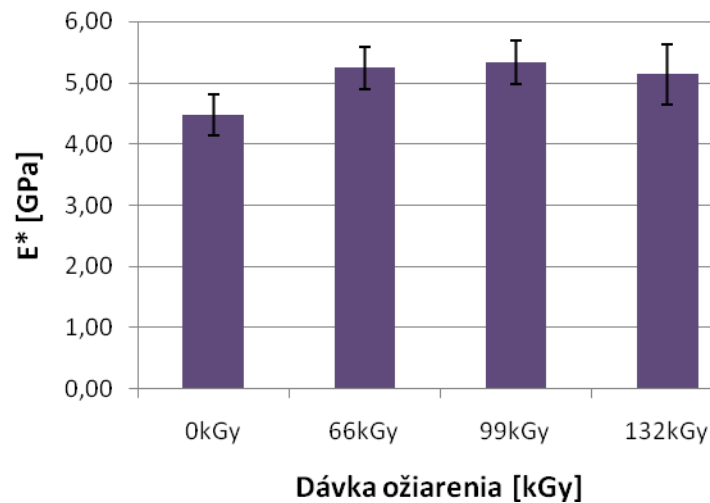
Obr. 50 Vtlačovaný modul pružnosti ( $EIT$ ) PA 6 – 6% sieťujúceho činidla

Z výsledkov merania mikrotvrdoosti bolo zistené, že najmenšia hodnota modulu ( $EIT$ ) bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy, zatiaľ čo najväčšia hodnota bola nameraná u dávky ožiarenia 99 kGy (Obr.50, Tab.11).



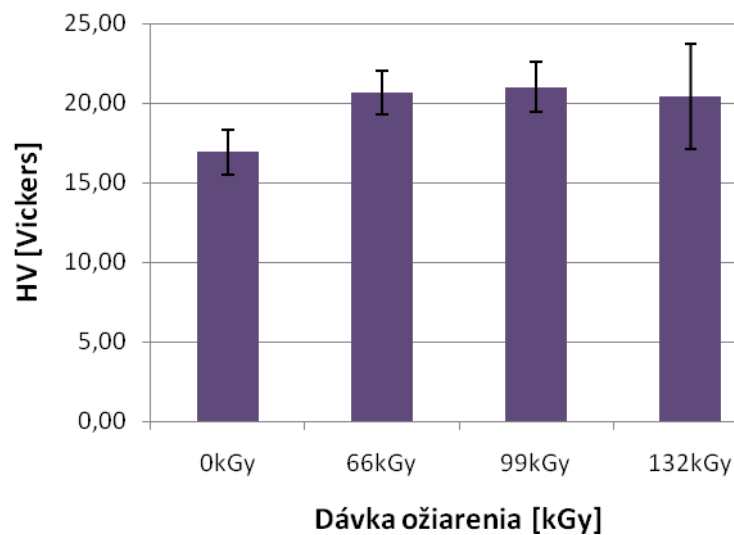
Obr. 51 Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PA – 6% sieťujúceho činidla

Najväčšia hodnota redukovaného modulu pružnosti ( $E_r$ ) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 99 kGy, naopak najmenšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy (Obr.51, Tab.11).



Obr. 52 Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 6% sieťujúceho čidla

Pri skúške mikrotvrdoosti komplexného modulu pružnosti ( $E^*$ ) bola najväčšia hodnota vtláčovanej tvrdoosti zistená u dávky ožiarenia 99 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.52, Tab.11).



Obr. 53 Tvrdoosť (HV) PA – 6% sieťujúceho čidla

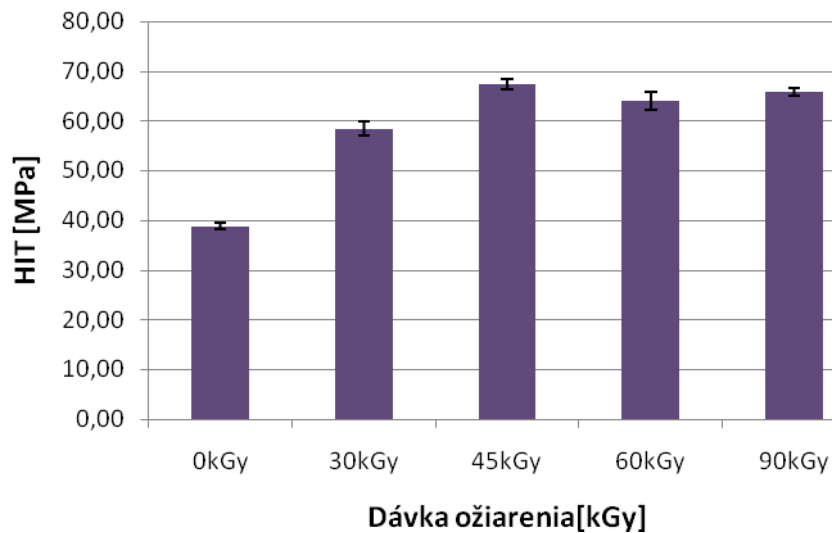
Najmenšia hodnota tvrdoosti (HV) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 0 kGy, naopak najväčšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 99 kGy (Obr.53, Tab.11).

## 7.2.2 Výsledky mikrotvrdości materiálu PP

## • PP neplnený

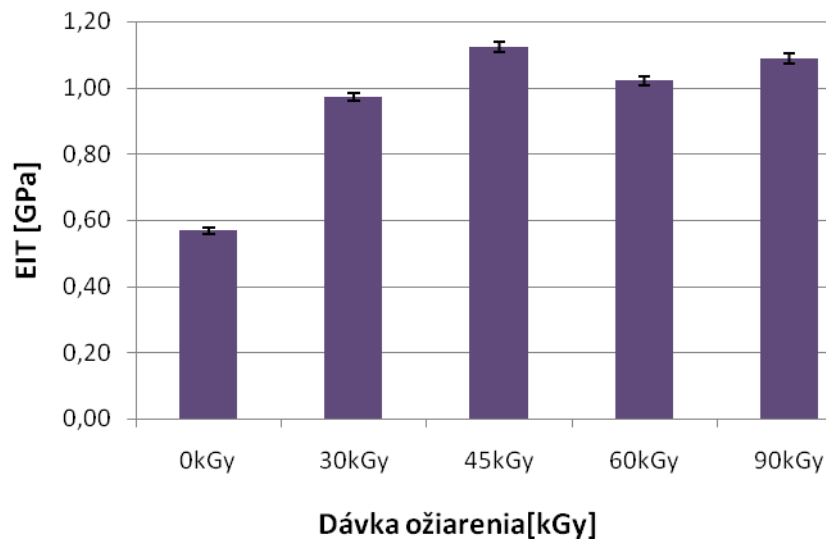
Tab. 12 Hodnoty PP - neplnený

	0kGy	30kGy	45kGy	60kGy	90kGy
HIT [MPa]	38,82	58,45	67,32	64,08	65,85
EIT [GPa]	0,57	0,97	1,12	1,02	1,09
Er [GPa]	0,62	1,07	1,23	1,12	1,19
E* [GPa]	0,62	1,07	1,23	1,12	1,19
HV [Vickers]	3,66	5,52	6,35	6,05	6,22
CIT [%]	13,04	11,76	11,26	11,96	11,07
RIT [%]	-0,03	-0,05	-0,07	-0,06	-0,07
hc [nm]	32668,23	26620,37	24778,36	25427,31	25086,49
hp [nm]	21760,00	18567,54	17216,70	17628,04	17359,99



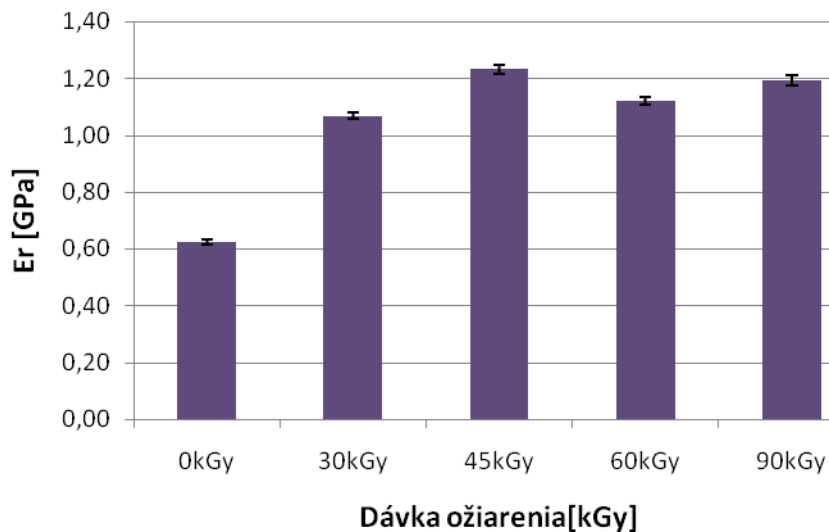
Obr. 54 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PP – neplnený

Pri skúške mikrotvrdości bola najväčšia hodnota vtlačovanej tvrdosti (HIT) zistená u dávky ožiarenia 45 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.54, Tab.12).



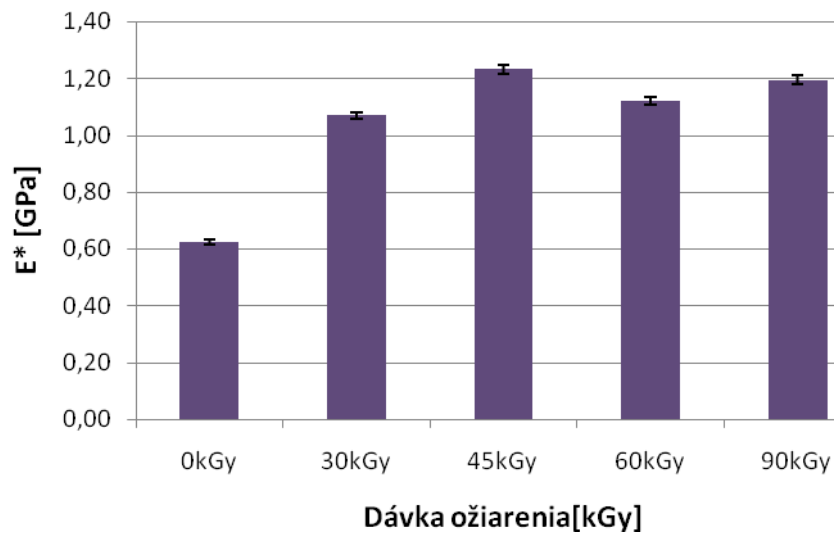
Obr. 55 Vtlačovaný modul pružnosti ( $EIT$ ) PP – neplnený

Z výsledkov merania mikrotvrdoosti bolo zistené, že najmenšia hodnota modulu ( $EIT$ ) bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy, zatiaľ čo najväčšia hodnota bola nameraná u dávky ožiarenia 45 kGy (Obr.55, Tab.12).



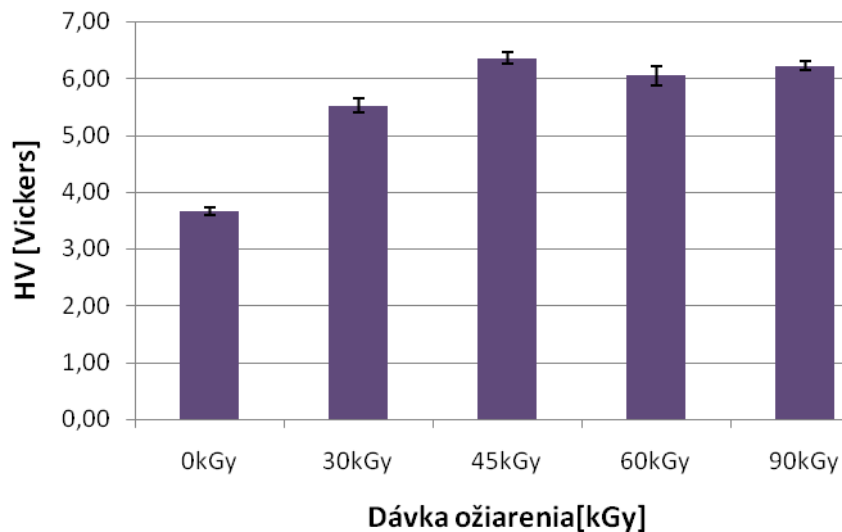
Obr. 56 Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PP – neplnený

Najväčšia hodnota redukovaného modulu pružnosti ( $E_r$ ) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 45 kGy, naopak najmenšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy (Obr.56, Tab.12).



Obr. 57 Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PP – neplnený

Pri skúške mikrotvrdoosti komplexného modulu pružnosti ( $E^*$ ) bola najväčšia hodnota vtláčovanej tvrdoosti zistená u dávky ožiarenia 45 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.57, Tab.12).



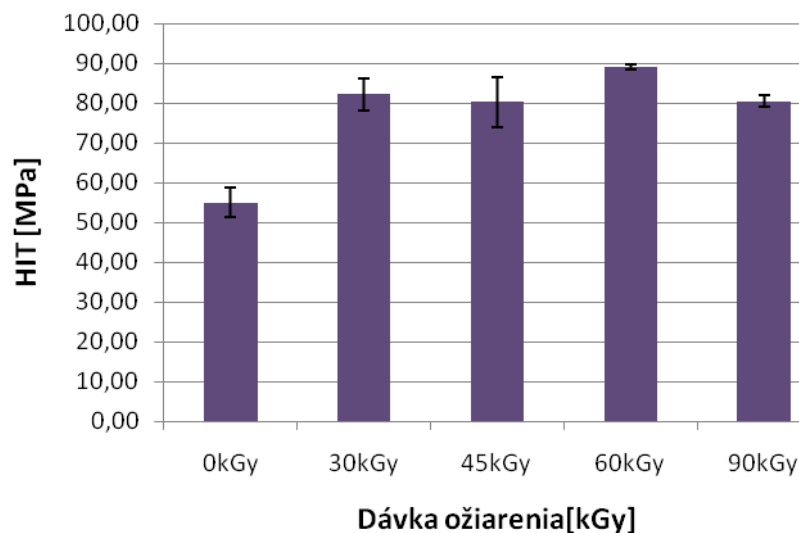
Obr. 58 Tvrdoosť (HV) PP – neplnený

Najmenšia hodnota tvrdoosti (HV) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 0 kGy, naopak najväčšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 45 kGy (Obr.58, Tab.12).

- PP plnený 25% sieťujúceho činidla

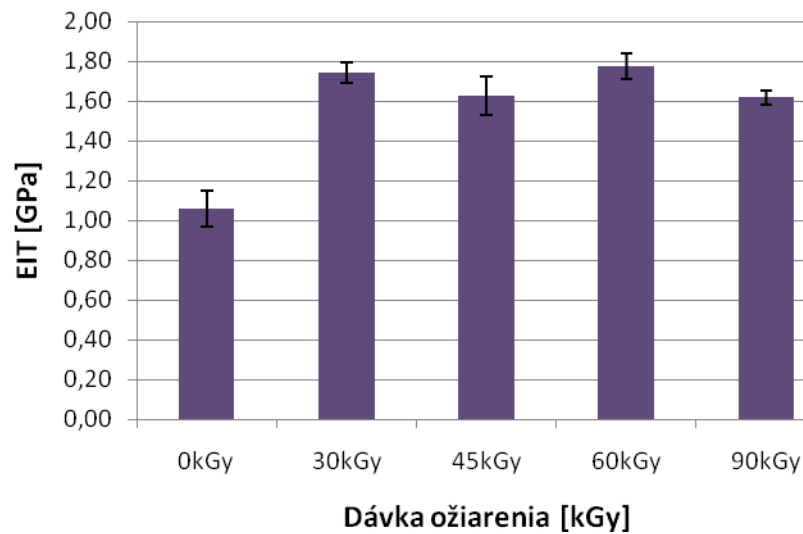
Tab. 13 Hodnoty PP – plnený 25% sieťujúceho činidla

	0kGy	30kGy	45kGy	60kGy	90kGy
HIT [Mpa]	54,95	82,11	80,17	89,03	80,46
EIT [Gpa]	1,06	1,74	1,63	1,77	1,62
Er [Gpa]	1,16	1,91	1,79	1,95	1,78
E* [Gpa]	1,16	1,91	1,81	1,95	1,78
HV [Vickers]	5,19	7,75	7,57	8,40	7,59
CIT [%]	11,62	11,04	10,71	11,36	11,13
RIT [%]	-0,06	-0,08	-0,08	-0,08	-0,07
hc [nm]	27439,75	22390,33	22725,96	21592,17	22650,11
hp [nm]	19761,39	16959,61	16929,52	16123,87	16797,69



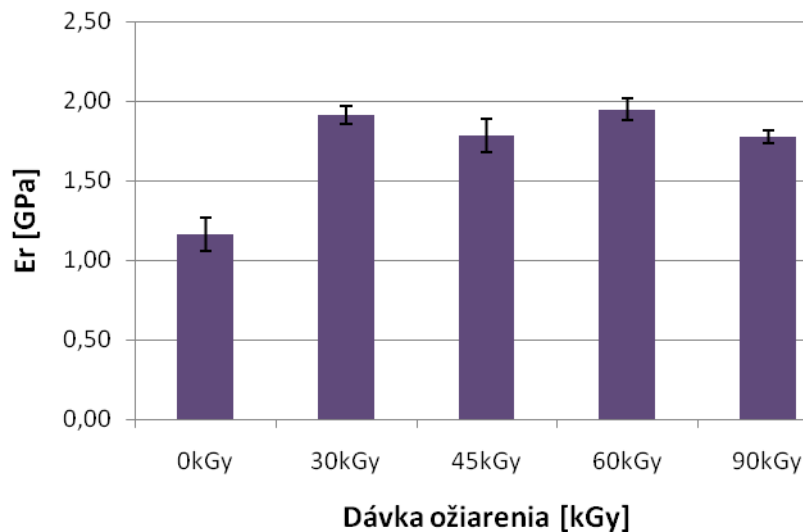
Obr. 59 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PP – plnený 25% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdoosti bola najväčšia hodnota vtlačovanej tvrdosti (HIT) zistená u dávky ožiarenia 60 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.59, Tab.13).



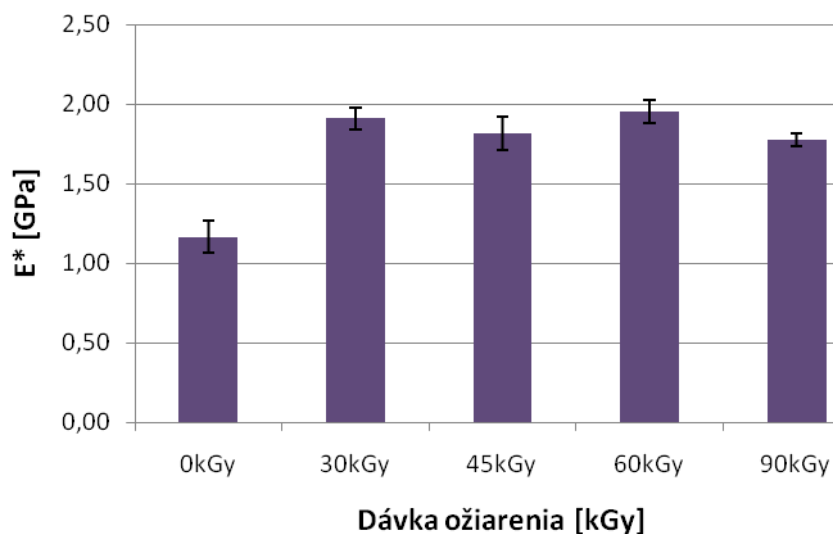
Obr. 60 Vtlačovaný modul pružnosti ( $E_{IT}$ ) PP – plnený 25% sieťujúceho činidla

Z výsledkov merania mikrotvrdości bolo zistené, že najmenšia hodnota modulu ( $E_{IT}$ ) bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy, zatiaľ čo najväčšia hodnota bola nameraná u dávky ožiarenia 60 kGy (Obr.60, Tab.13).



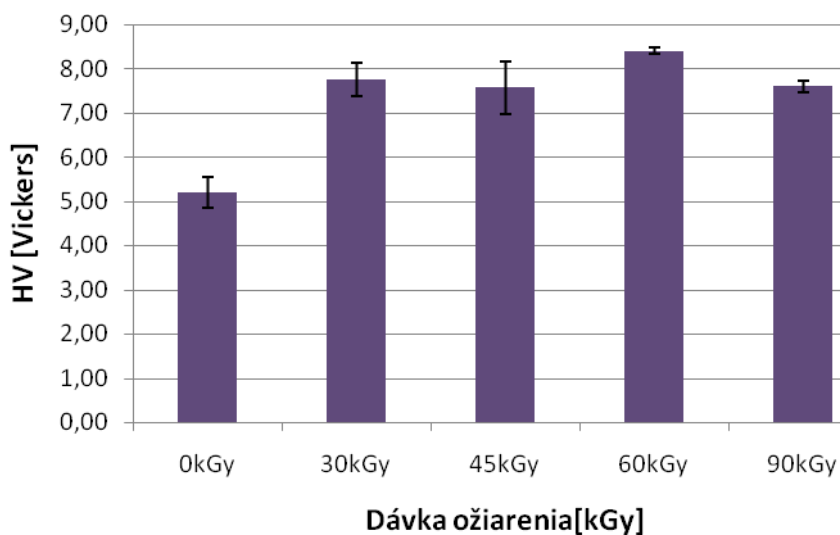
Obr. 61 Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PP – plnený 25% sieťujúceho činidla

Najväčšia hodnota redukovaného modulu pružnosti ( $E_r$ ) pri skúške mikrotvrdości bola nameraná u dávky ožiarenia 60 kGy, naopak najmenšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 0 kGy (Obr.61, Tab.13).



Obr. 62 Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PP- plnený 25% sieťujúceho činidla

Pri skúške mikrotvrdoosti komplexného modulu pružnosti ( $E^*$ ) bola najväčšia hodnota vtláčovanej tvrdoosti zistená u dávky ožiarenia 60 kGy zatiaľ, čo najmenšia hodnota dávky bola nameraná u dávky 0 kGy (Obr.62, Tab.13).



Obr. 63 Tvrdoosť (HV) PP – plnený 25% sieťujúceho činidla

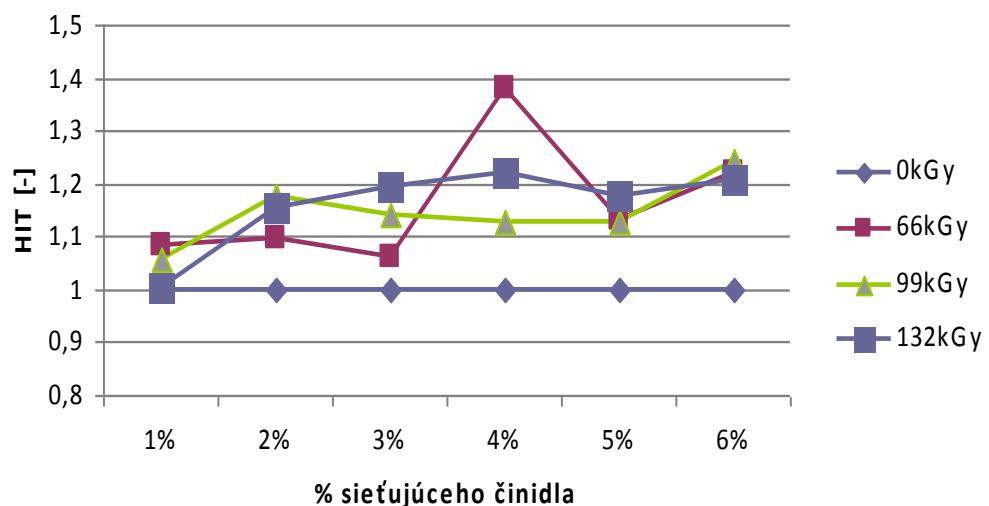
Najmenšia hodnota tvrdoosti (HV) pri skúške mikrotvrdoosti bola nameraná u dávky ožiarenia 0 kGy, naopak najväčšia hodnota modulu bola zistená u dávky ožiarenia 60 kGy (Obr.63, Tab.13).



## DISKUSIA VÝSLEDKOV

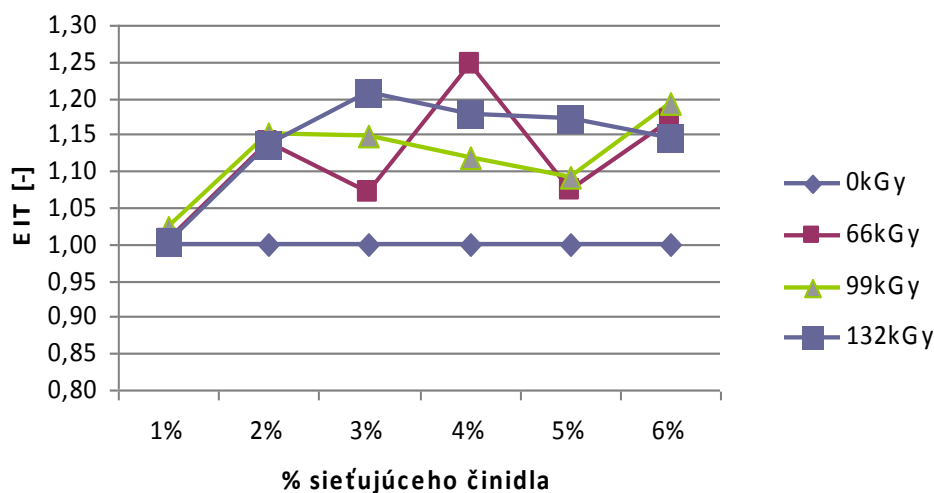
Pre experimentálnu časť boli vybrané dva typy materiálov PA a PP. Materiál PA bol plnený sieťujúcim činidlom a to od 1% do 6% a ožiarený dávkami 66, 99 a 132 kGy. Materiál PP bol použitý neplnený a plnený 25% sklenených vlákien. Dávky ožiarenia boli použité u PP (plnený, neplnený) nasledujúce: 30, 45, 60 a 90 kGy. Súborny nameraných hodnôt boli spracované a výsledky graficky znázornené. Pre jednoduchšiu orientáciu a rýchle porovnanie nameraných hodnôt, boli použité tzv. bezrozmerné hodnoty, vyjadrené ako pomer jednotlivých meraní, k hodnote neožiareného skúšobného telieska dosiahnuté v priebehu príslušného merania.

### Materiál PA



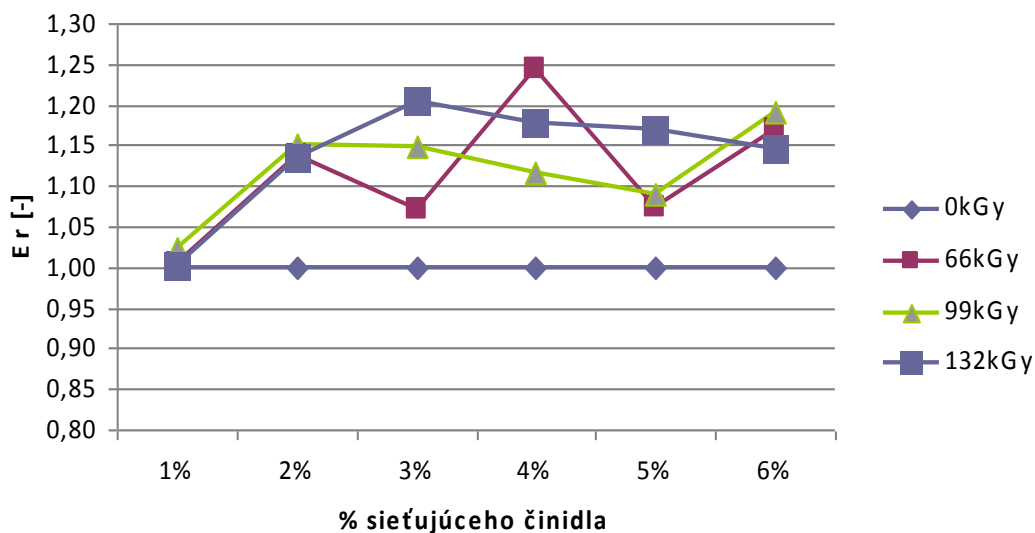
Obr. 64 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) 1-6% sieťujúceho činidla

Z nameraných výsledkov pri skúške mikrotvrdości vyplýva, že najmenšie hodnoty vtlačovanej tvrdosti boli zistené u neožiareného PA. S rastúcim množstvom sieťujúceho činidla dochádza k miernemu poklesu vtlačovanej tvrdosti. Pokles vtlačovanej tvrdosti je spôsobený tým, že sieťujúce činidlo sa chová ako monomer, ktorý zmäkčuje neožiarený PA. Pri ožiarení dochádza k dodatočnému sieťovaniu PA (v dôsledku reakcie sieťujúceho činidla) a tým k zvýšeniu hodnôt vtlačovanej tvrdosti. So zvyšujúcou dávkou ožiarenia dochádza k nárastu tvrdosti ako vidíme na Obr. 64 Najväčšie hodnoty vtlačovanej tvrdosti bolo dosiahnuté u plnenia 4% sieťujúceho činidla a dávkou ožiarenia 66 kGy, ktorá vytvorila povrchovú vrstvu o najväčšej vtlačovanej tvrdosti (o 38% vyššia tvrdosť než tomu bolo u neožiareného PA).



Obr. 65 Vtlačovaný modul pružnosti ( $E_{IT}$ ) 1-6% sieťujúceho činidla

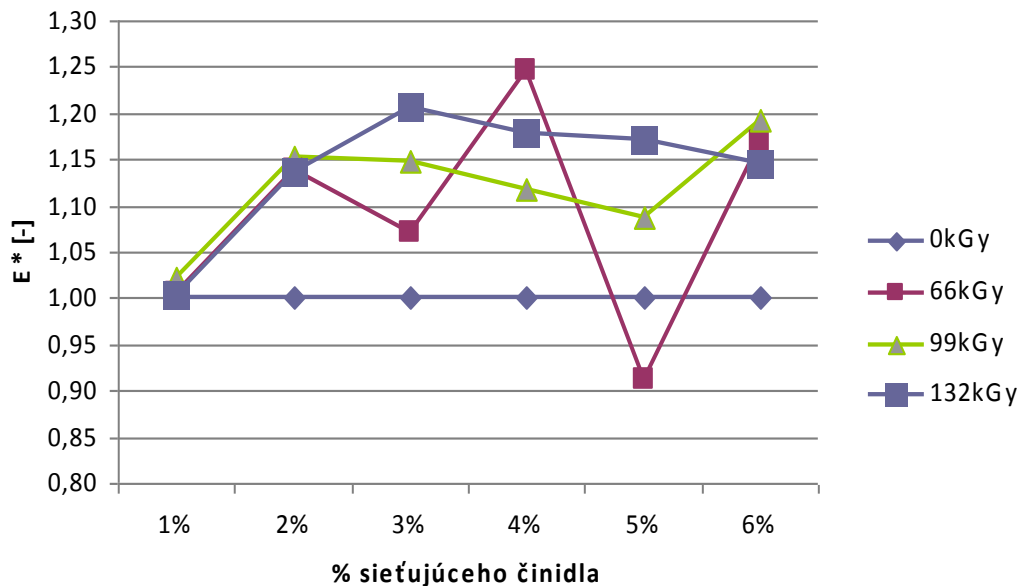
Pri skúške mikrotvrdoosti bolo zistené, že najvyššej hodnoty vtlačovaného modulu pružnosti (mikrotuhosť) bola nameraná u dávky ožiarenia 66 kGy s plnením 4% sieťujúceho činidla (čo bolo o 20% viac v porovnaní s neožiareným PA Obr.65). Naopak najmenšie hodnoty vtlačovanej tvrdosti boli namerané u neožiareného PA. K poklesu hodnôt vtlačovaného modulu pružnosti došlo pri najvyšších dávkach ožiarenia (132 kGy), v dôsledku degradácie štruktúry materiálu.



Obr. 66 Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) 1-6% sieťujúceho činidla

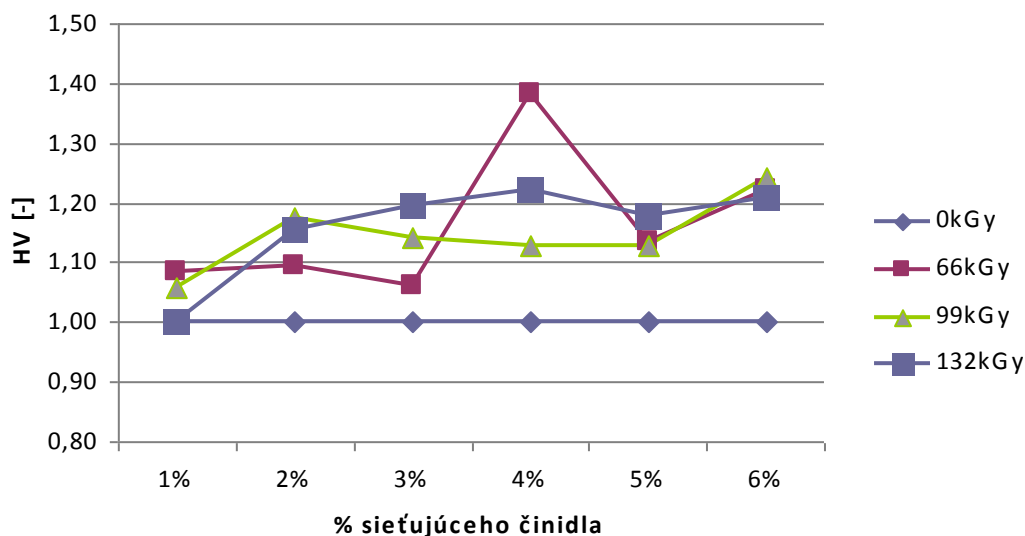
Z výsledkov merania mikrotvrdoosti bolo zistené, že najmenšej hodnoty redukovaného modulu pružnosti boli namerané u neožiareného PA (o 20% nižšia tvrdosť od ožiareného PA). Najväčšia hodnota redukovaného modelu pružnosti bola zistená u dávky ožiarenia 66

kGy s plnením 4% sieťujúceho činidla (Obr. 66). Pri vyšších dávkach ožiarenia dochádza v niektorých častiach štruktúry k degradačným procesom, čo má za následok postupne znižovanie hodnôt redukovaného modelu.



Obr. 67 Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) 1-6% sieťujúceho činidla

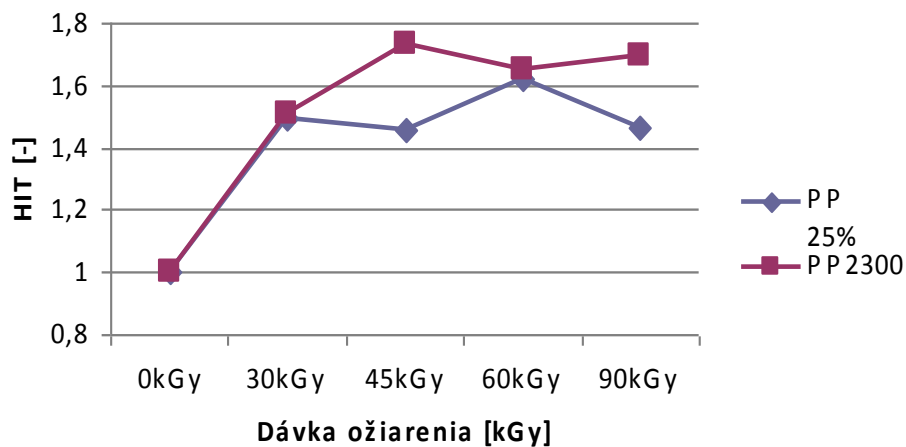
Pri skúške mikrotvrdoosti bolo zistené, že komplexný modul pružnosti dosiahol najvyššej hodnoty u dávky ožiarenia 66 kGy s plnením 4% sieťujúceho činidla (v porovnaní s neožiareným o 20 % vyššia hodnota). Naopak najmenej hodnoty bolo dosiahnuté u dávky ožiarenia 66 kGy s plnením 5% sieťujúceho činidla (Obr. 67). Pri vyšších dávkach ožiarenia dochádza v niektorých častiach štruktúry k degradačným procesom, čo má za následok postupne znižovanie hodnôt komplexného modelu.



Obr. 68 Tvrdosť (HV) 1-6% sieťujúceho činidla

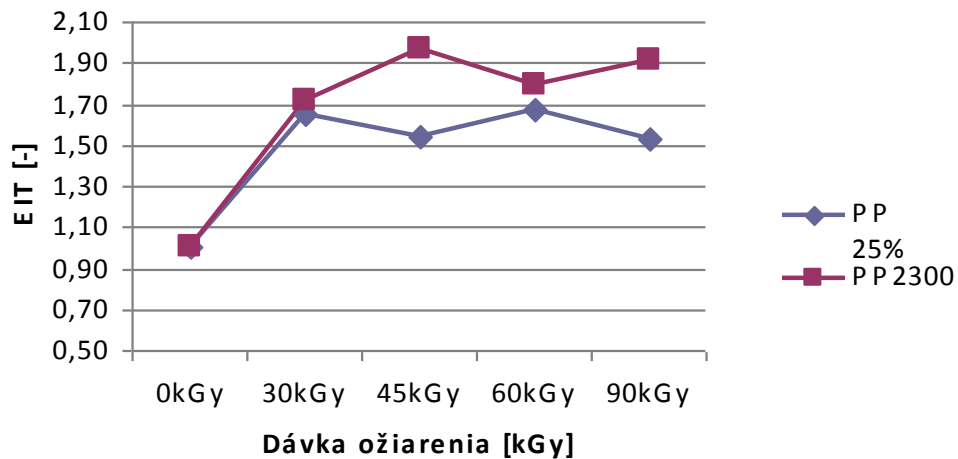
Z nameraných výsledkov pri skúške merania mikrotvrdoosti bolo zistené, že najväčšie hodnoty tvrdosti podľa Vickersa dosiahol materiál u dávky ožiarenia 66 kGy s plnením 4% sieťujúceho činidla (Obr. 68). Najmenšie hodnoty tvrdosti podľa Vickersa boli namerané u neožiareného PA. Pri vyšších dávkach ožiarenia dochádza v niektorých častiach štruktúry k degradačným procesom, čo má za následok postupne znižovanie hodnôt tvrdosti.

## Materiál PP



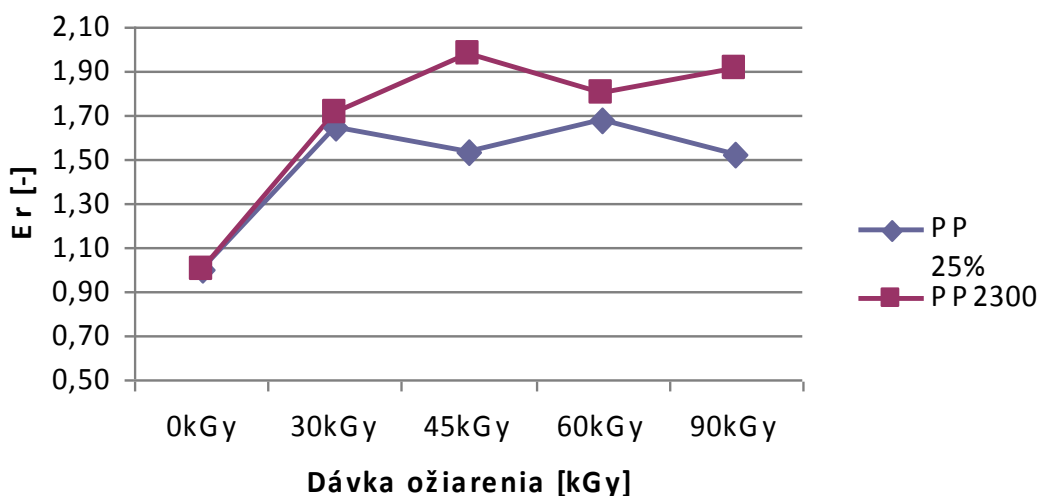
Obr. 69 Vtlačovaná tvrdosť (HIT)-PP plnený a neplnený

Z nameraných hodnôt pri skúške mikrotvrdosti bolo zistené, že najmenšie hodnoty vtláčovanej tvrdosti boli namerané u neožiareného neplneného a neožiareného plneného PP. Naopak najvyšších hodnôt vtláčovanej tvrdosti bolo dosiahnuté u neplneného PP ožiareného dávkou 45 kGy (o 75% vyšší v porovnaní s neožiareným PP) a u plneného PP ožiareného dávkou 60 kGy (o 60% vyšší v porovnaní s neožiareným PP) ako môžeme vidieť na Obr.69. Nárast vtláčovanej tvrdosti v povrchovej vrstve je spôsobený sieťovaním v dôsledku ožiarovania testovaného skúšobného telesa. Pri bližšom pohľade na výsledky mikrotvrdosti je zrejmé, že u najvyšších dávkach ožiarovania dochádza k poklesu mikrotvrdosti, ktoré môžu byť spôsobené degradáciou materiálu vplyvom ožiarovania.



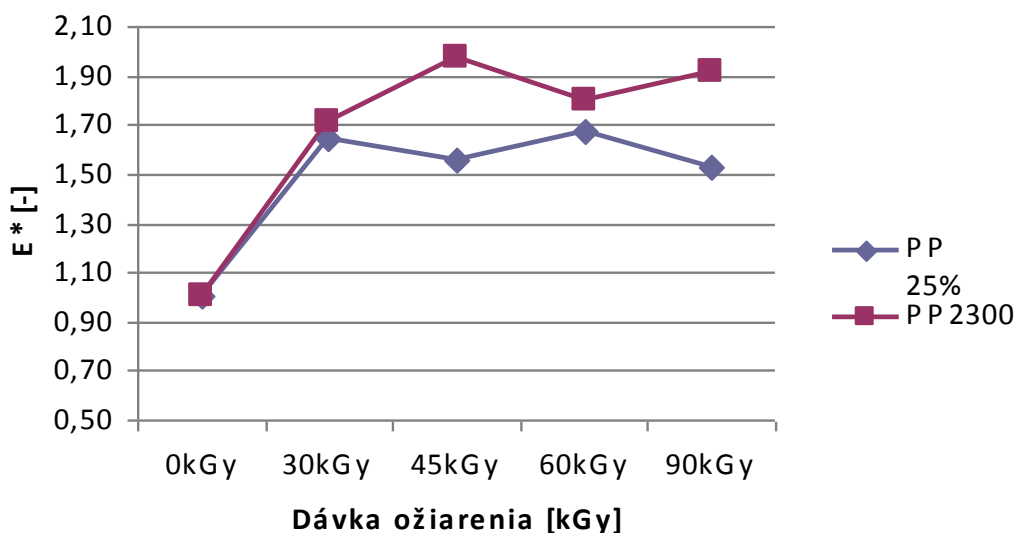
Obr. 70 Vtláčovaný modul pružnosti (EIT)-PP plnený a neplnený

Z výsledkov merania mikrotvrdosti bolo zistené, že najvyššie hodnoty vtláčovaného modulu pružnosti bolo dosiahnuté u neplneného PP ožiareného dávkou 45 kGy (o 95% vyšší v porovnaní s neožiareným PP) a u plneného PP ožiareného dávkou 60 kGy (o 65% vyšší v porovnaní s neožiareným PP). Naopak najmenších hodnôt bolo u vtláčovaného modulu pružnosti dosiahnuté u neplneného neožiareného a u plneného neožiareného PP ako môžeme vidieť na Obr. 70.



Obr. 71 Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ )-PP plnený a neplnený

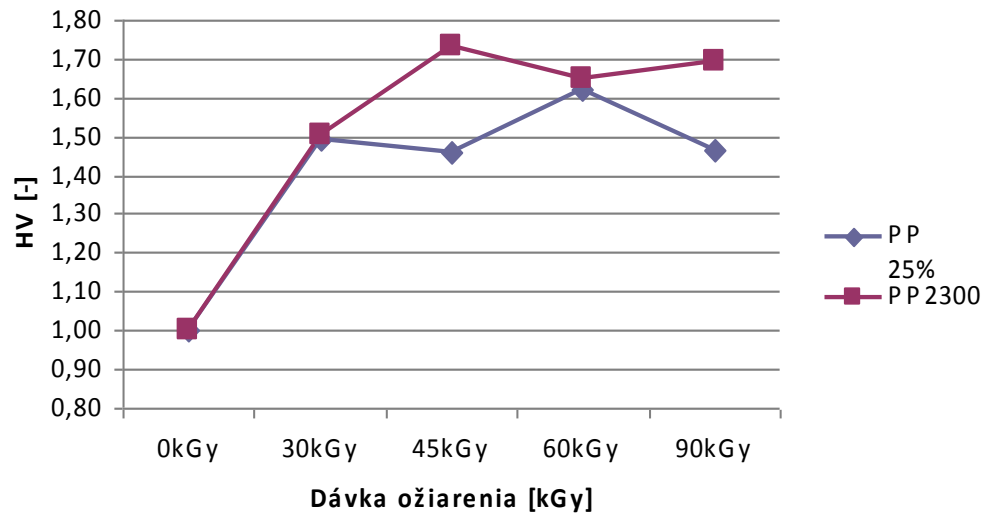
Z nameraných hodnôt pri skúške mikrotvrdoosti bolo zistené, že redukovaný modul pružnosti dosiahol najmenších hodnôt u neožiareného neplneného a tiež neožiareného plneného PP. Najvyšších hodnôt pri tejto skúške bolo dosiahnutých u neplneného PP s dávkou ožiarenia 45 kGy (o 95% vyšší v porovnaní s neožiareným PP) a u plneného PP s dávkou ožiarenia 60kGy (o 65% vyšší v porovnaní s neožiareným PP) (Obr. 71).



Obr. 72 Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ )-PP plnený a neplnený

Pri skúške mikrotvrdoosti bolo zistené, že najvyššej hodnoty komplexného modulu pružnosti bolo dosiahnuté u neplneného PP ožiareného dávkou 45 kGy (o 95% vyšší v porovnaní s neožiareným PP) a u plneného PP ožiareného dávkou 60 kGy (o 65% vyšší v porovnaní

s neožiareným PP). Naopak najmenších hodnôt bolo dosiahnutých u neplneného neožiareného PP a taktiež u neožiareného plneného PP (Obr. 72).



Obr. 73 Tvrdosť (HV)-PP plnený a neplnený

Z nameraných výsledkov pri skúške merania mikrotvrdoosti bolo zistené, že najväčšie hodnoty tvrdosti podľa Vickersa dosiahol materiál neplnený ožiarený dávkou 45 kGy (o 75% vyšší v porovnaní s neožiareným PP) a materiál plnený s dávkou ožiarenia 60kGy (o 65% vyšší v porovnaní s neožiareným PP), ktorý vytvoril povrchovú vrstvu o najväčšej tvrdosti. Najmenšie hodnoty tvrdosti podľa Vickersa boli zistené u neožiareného neplneného PP a u neožiareného plneného PP (Obr. 73).

## ZÁVER

Predložená diplomová práca rieši problém merania mikrotvrlosti metódou DSI ožiarených polymérov. Boli vybrané dva typy polymérnych materiálov a to PA a PP (plnený, neplnený). Oba typy polymérnych materiálov boli ožiarené príslušnými dávkami ožiarenia. Materiál PA bol ožiarený dávkami 66, 99 a 132 kGy a bol plnený sieťujúcim činidlom v rozsahu 1 – 6%. Materiál PP bol použitý neplnený a plnený 25% sklenených vlákien a následne ožiarený dávkami 30, 45, 60 a 90 kGy.

Z nameraných hodnôt mikrotvrlosti prevádzaných metódou DSI vyplýva, že u neožiareného PA sa s rastúcim množstvom sieťujúceho činidla dochádza k poklesu vtláčovanej tvrdosti a tuhosti meraných skúšobných telies. Aplikácie jednotlivých dávok ožiarenia spôsobujú nárast hodnôt vtláčovanej tvrdosti a tuhosti a to najviac u dávky ožiarenia 66 kGy a s množstvom sieťujúceho činidla 4 %. Pri vyšších dávkach ožiarenia a väčším množstvom sieťujúceho činidla dochádza k poklesu nameraných hodnôt vtláčovanej tvrdosti a tuhosti.

U neplneného PP bolo zistené, že najmenšie hodnoty mikrotvrlosti (vtlačovaná tvrdosť) boli zistené u neožiareného PP, zatiaľ čo u ožiareného PP sa mikrotvrdosť zvyšovala. Najväčšia hodnota mikrotvrlosti bola zistená u dávky 45 kGy a následne začala klesať.

Plnený PP vykazoval najmenšiu hodnotu mikrotvrlosti v neožiarenom stave, zatiaľ čo najvyššej hodnoty dosiahol u dávky ožiarenia 60 kGy.

U oboch meraných polymérnych materiálov bolo zistené, že hodnoty mikrotvrlosti (vtlačovanej tvrdosti a tuhosti) rastú iba do určitej dávky ožiarenia a potom dochádza k ich poklesu to je spôsobené čiastočnou degradáciou materiálu, ktorá má na tieto vlastnosti vplyv.



**ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY**

- [1] DOLEŽAL, Pavel; PACAL, Bohumil. *Hodnocení mikrotvrlosti struktur materiálů*. Brno : VUT, 2006. 41 s.
- [2] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Vyd. 1. Havlíčkův Brod : VŠCHT Praha, 2010. 212 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [3] PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Vyd. 1. Praha : Nakladatelství technické literatury Alfa, 1989. 552 s.
- [4] DUŠEK, Jiří. *Tvrlost, mikrotvrlost, nanotvrlost - čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. 171 s. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [5] PÍŠEK, František; VETIŠKA, Aleš; ŠKAREK, Jiří. *Nauka o materiálu II.* Vyd. 1. Praha : Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. 660 s.
- [6] <http://www.converter.cz/jednotky/tvrlost-brinell.htm>
- [7] ABRAHAM, Jozef. *Vplyv množstva sieťovacieho činidla na vlastnosti ožiareného polyamidu*. Zlín, 2010. 105 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [8] <http://www.lpm.cz/index.html>
- [9] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>
- [10] BRANDŠTETR, Jiří. *CHEMIE pro posluchače Fakulty strojního inženýrství*. 1. Brno : VUTIUM, 1999. 183 s.)
- [11] Technická norma ČSN 42 0371 – skúška podľa Brinella
- [12] Technická norma ČSN 42 0374 – skúška podľa Vickerse
- [13] Technická norma ČSN 42 0373 – skúška podľa Rockwella

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

A	Plocha odtlačku [mm]
A <sub>p</sub>	Projektová plocha [mm]
C	Geometrická konštanta
CIT	Indentačný creep [%]
D	Priemer vnikajúcej guľky [mm]
d	aritmetický priemer dĺžky uhlopriečok odtlačku [mm]
DSI	Depth Sensing Indentation – Inštrumentovaná vnikajúca skúška tvrdosti
EIT	Vtlačovací modul pružnosti [GPa]
E <sub>r</sub>	Redukovaný modul pružnosti [GPa]
E*	Komplexný modul pružnosti [GPa]
F	Zaťažujúca sila [N]
H	Tvrdosť
HB	Tvrdosť podľa Brinella
h <sub>c</sub>	Hĺbka odtlačku [nm]
HIT	Vtlačovacia tvrdosť [MPa]
H <sub>CH</sub>	Mikrotvrdosť podľa Berkoviča (Chruščova)
HK	Tvrdosť Knoop
h <sub>p</sub>	Kontaktná hĺbka odtlačku [nm]
HV	Tvrdosť podľa Vickerse
HVC	Tvrdosť podľa Rockwella
kGy	Jednotka intenzity žiarenia
KHN	Mikrotvrdosť podľa Knoop
l	Dĺžka dlhšej uhlopriečky odtlačku [mm]
NHCO	Amidové skupiny

PA	Polyamid
PA 6	Polyamid 6
PP	Polypropylén
RIT	Relaxácia [%]
VHN	Vickersova mikrotvrdosť [HV]
W	Veľkosť zaťaženia ihlanu [kg]

**ZOZNAM OBRÁZKOV**

<i>Obr. 1 Štruktúra makromolekúl</i> .....	13
<i>Obr. 2 Makromolekulárny reťazec v amorfných a semikryštalických polymérnych materiáloch</i> .....	14
<i>Obr. 3 Skúška tvrdosti podľa Brinella [6]</i> .....	17
<i>Obr. 4 Skúška podľa Vickerse [6]</i> .....	18
<i>Obr. 5 Skúška podľa Rockwella</i> .....	19
<i>Obr. 6 Skúška podľa Knoopu [6]</i> .....	20
<i>Obr. 7 Skúška mikrotrvdosti podľa Vickerse [4]</i> .....	24
<i>Obr. 8 Schéma pravidelného trojbokého ihlanu –Berkovičov indenter [4]</i> .....	25
<i>Obr. 9 Geometrie Knoopova indentoru [4]</i> .....	26
<i>Obr. 10 Porovnanie odozvy materiálu na jednoosom a viacosom namáhaní [4]</i> .....	29
<i>Obr. 11 Nástavec a merací okulár mikrotrvdomeru Hanneman</i> .....	30
<i>Obr. 12 Schéma Bergsmannovho mikrotrvdomeru</i> .....	31
<i>Obr. 13 Schéma Girschingovho mikrotrvdomeru</i> .....	32
<i>Obr. 14 Schéma mikrotrvdomeru PMT – 3</i> .....	32
<i>Obr. 15 Schéma a pohľad na mikrotrvdomer Durimet</i> .....	33
<i>Obr. 16 Základné typy polyamidu [7]</i> .....	37
<i>Obr. 17 Štruktúrny vzorec PP [9]</i> .....	38
<i>Obr. 18 Priestorový model PP [9]</i> .....	39
<i>Obr. 19 Tvar a rozmery skúšobných telies</i> .....	42
<i>Obr. 20 Prístroj CSM</i> .....	43
<i>Obr. 21 Popis prístroja CSM</i> .....	46
<i>Obr. 22 Popis prístroja CSM 2</i> .....	47
<i>Obr. 23 Pracovisko pre meranie mikrotrvdosti</i> .....	47
<i>Obr. 24 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 1% sieťujúceho činidla</i> .....	49
<i>Obr. 25 Vtlačovaný modul pružnosti (EIT) PA 6 – 1% sieťujúceho činidla</i> .....	50
<i>Obr. 26 Redukovaný modul pružnosti (Er) PA – 1% sieťujúceho činidla</i> .....	50
<i>Obr. 27 Komplexný modul pružnosti (E*) PA – 1% sieťujúceho činidla</i> .....	51
<i>Obr. 28 Tvrdosť (HV) PA – 1% sieťujúceho činidla</i> .....	51
<i>Obr. 29 Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 2% sieťujúceho činidla</i> .....	52
<i>Obr. 30 Vtlačovaný modul pružnosti (EIT) PA 6 – 2% sieťujúceho činidla</i> .....	53
<i>Obr. 31 Redukovaný modul pružnosti (Er) PA – 2% sieťujúceho činidla</i> .....	53

<i>Obr. 32</i> Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 2% sieťujúceho činidla .....	54
<i>Obr. 33</i> Tvrdosť (HV) PA – 2% sieťujúceho činidla.....	54
<i>Obr. 34</i> Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 3% sieťujúceho činidla .....	55
<i>Obr. 35</i> Vtlačovaný modul pružnosti (EIT) PA 6 – 3% sieťujúceho činidla.....	56
<i>Obr. 36</i> Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PA – 3% sieťujúceho činidla .....	56
<i>Obr. 37</i> Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 3% sieťujúceho činidla .....	57
<i>Obr. 38</i> Tvrdosť (HV) PA – 3% sieťujúceho činidla.....	57
<i>Obr. 39</i> Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 4% sieťujúceho činidla .....	58
<i>Obr. 40</i> Vtlačovaný modul pružnosti (EIT) PA 6 – 4% sieťujúceho činidla.....	59
<i>Obr. 41</i> Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PA – 4% sieťujúceho činidla .....	59
<i>Obr. 42</i> Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 4% sieťujúceho činidla .....	60
<i>Obr. 43</i> Tvrdosť (HV) PA – 4% sieťujúceho činidla.....	60
<i>Obr. 44</i> Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 5% sieťujúceho činidla .....	61
<i>Obr. 45</i> Vtlačovaný modul pružnosti (EIT) PA 6 – 5% sieťujúceho činidla.....	62
<i>Obr. 46</i> Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PA – 5% sieťujúceho činidla .....	62
<i>Obr. 47</i> Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 5% sieťujúceho činidla .....	63
<i>Obr. 48</i> Tvrdosť (HV) PA – 5% sieťujúceho činidla.....	63
<i>Obr. 49</i> Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PA 6 – 6% sieťujúceho činidla .....	64
<i>Obr. 50</i> Vtlačovaný modul pružnosti (EIT) PA 6 – 6% sieťujúceho činidla.....	65
<i>Obr. 51</i> Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PA – 6% sieťujúceho činidla .....	65
<i>Obr. 52</i> Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PA – 6% sieťujúceho činidla .....	66
<i>Obr. 53</i> Tvrdosť (HV) PA – 6% sieťujúceho činidla.....	66
<i>Obr. 54</i> Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PP – neplnený.....	67
<i>Obr. 55</i> Vtlačovaný modul pružnosti (EIT) PP – neplnený .....	68
<i>Obr. 56</i> Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PP – neplnený.....	68
<i>Obr. 57</i> Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PP – neplnený.....	69
<i>Obr. 58</i> Tvrdosť (HV) PP – neplnený .....	69
<i>Obr. 59</i> Vtlačovaná tvrdosť (HIT) PP – plnený 25% sieťujúceho činidla.....	70
<i>Obr. 60</i> Vtlačovaný modul pružnosti (EIT) PP – plnený 25% sieťujúceho činidla .....	71
<i>Obr. 61</i> Redukovaný modul pružnosti ( $E_r$ ) PP – plnený 25% sieťujúceho činidla .....	71
<i>Obr. 62</i> Komplexný modul pružnosti ( $E^*$ ) PP- plnený 25% sieťujúceho činidla .....	72
<i>Obr. 63</i> Tvrdosť (HV) PP – plnený 25% sieťujúceho činidla.....	72
<i>Obr. 64</i> Vtlačovaná tvrdosť (HIT) I-6% sieťujúceho činidla.....	73

---

<i>Obr. 65 Vtlačovaný modul pružnosti (EIT)1-6% sietujúceho činidla .....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 66 Redukovaný modul pružnosti (Er)1-6% sietujúceho činidla.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 67 Komplexný modul pružnosti (E*)1-6% sietujúceho činidla.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 68 Tvrdosť (HV) 1-6% sietujúceho činidla .....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 69 Vtlačovaná tvrdosť (HIT)-PP plnený a neplnený.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 70 Vtlačovaný modul pružnosti (EIT)-PP plnený a neplnený .....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 71 Redukovaný modul pružnosti (Er)-PP plnený a neplnený.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 72 Komplexný modul pružnosti (EIT)-PP plnený a neplnený .....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 73 Tvrdosť (HV)-PP plnený a neplnený .....</i>	<i>79</i>

**ZOZNAM TABULIEK**

<i>Tab. 1 Mohsova stupnice tvrdosti a tvrdosť niektorých látok podľa tejto stupnice.....</i>	11
<i>Tab. 2 Tvrdosť podľa Vickersa – oblasti skúšobného zaťaženia pre kovové materiály .....</i>	23
<i>Tab. 3 Vlastnosti polyamidu 6 [8] .....</i>	38
<i>Tab. 4 Vlastnosti polypropylénu PP [8] .....</i>	40
<i>Tab. 5 Rozmery prístroja .....</i>	47
<i>Tab. 6 Hodnoty PA 6 – 1% sieťujúceho činidla.....</i>	49
<i>Tab. 7 Hodnoty PA 6 – 2% sieťujúceho činidla.....</i>	52
<i>Tab. 8 Hodnoty PA 6 – 3% sieťujúceho činidla.....</i>	55
<i>Tab. 9 Hodnoty PA 6 – 4% sieťujúceho činidla.....</i>	58
<i>Tab. 10 Hodnoty PA 6 – 5% sieťujúceho činidla.....</i>	61
<i>Tab. 11 Hodnoty PA 6 – 6% sieťujúceho činidla.....</i>	64
<i>Tab. 12 Hodnoty PP - neplnený.....</i>	67
<i>Tab. 13 Hodnoty PP – plnený 25% sieťujúceho činidla .....</i>	70