

Měření mechanických vlastností modifikovaných polymerů

Miroslav Judas

Bakalářská práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav Judas**
Osobní číslo: **T13074**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření mechanických vlastností modifikovaných polymerů**

Zásady pro vypracování:

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

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího BP.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

8. ledna 2016

Termín odevzdání bakalářské práce:

20. května 2016

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: JUDAS MIROSLAV

Obor: T.Z

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji 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 11.5.2016..

..... Judas

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

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

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

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

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

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

¹¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá charakteristikou mechanických vlastností polymerů. Při měření a zkoumání vlastností polymerů, jakými jsou vtisková tvrdost, vtiskový modul, vtiskové tečení a deformační práce při vtisku indentoru, byla využita Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI (Depth Sensing Indentation). Pomocí této metody byly zkoumány vlastnosti základních polymerů a polymerů modifikovaných zářením beta. Změny vlastností byly studovány v závislosti na aplikované dávce záření.

Klíčová slova: mechanické vlastnosti, mikrotvrdost, beta záření, Instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI), modifikace polymerů, polypropylen

ABSTRACT

The Bachelor thesis deals with the characterization of mechanical properties of polymers. The depth sensing indentation method (DSI) was used for a measuring and investigating of polymers properties such as indentation hardness, indentation modulus, indentation creep and deformation work during indentation. Using this method were investigated properties of basic polymers and polymers modified by beta rays. Changes in these characteristics were studied depending on the amount of applied radiation dose.

Keywords: mechanical properties, microhardness, beta rays, Depth Sensing Indentation (DSI), modification of polymers, polypropylene

Rád bych poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a obětavý přístup při řešení bakalářské práce.

Chtěl bych také poděkovat mé rodině za morální a materiálovou podporu, kterou mi poskytovala během celého studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY A JEJICH ROZDĚLENÍ	12
1.1 DĚLENÍ POLYMERŮ Z HLEDISKA JEJICH CHOVÁNÍ ZA BĚŽNÉ TEPLoty	12
1.1.1 Elastomery.....	12
1.1.2 Plasty	12
1.2 ROZDĚLENÍ DLE USPOŘÁDÁNÍ NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURY	13
1.3 ROZDĚLENÍ DLE USPOŘÁDÁNÍ MAKROMOLEKULÁRNÍCH ŘETĚZCŮ	13
1.4 ROZDĚLENÍ PODLE PŮVODU.....	14
2 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	15
2.1 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ PŮSOBNÍ ZÁŘENÍ NA LÁTKU	15
2.1.1 Dávka	15
2.1.2 Dávkový příkon.....	15
2.1.3 Energie	15
2.2 ZÁKLADNÍ DRUHY ZÁŘENÍ.....	16
2.2.1 Záření β	16
2.2.2 Záření γ	16
3 ZKOUŠKY TVRDOSTI	18
3.1 VRYPOVÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	18
3.1.1 Martensova zkouška tvrdosti.....	18
3.2 ODRAZOVÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	19
3.2.1 Shoreho zkouška	19
3.3 VNIKACÍ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	20
3.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella	20
3.3.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	21
3.3.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	22
4 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI DSI	24
4.1 PRINCIP ZKOUŠKY	24
4.2 INDENTAČNÍ KŘIVKY	25
4.3 ZPRACOVÁNÍ DAT.....	26
4.3.1 Vtisková tvrdost H_{IT}	26
4.3.2 Tvrdost podle Vickerse H_{VIT}	26
4.3.3 Vtiskový modul E_{IT}	26
4.3.4 Vtiskové tečení C_{IT}	26
4.3.5 Deformační práce	27
4.4 FAKTORY, OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ.....	27
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	30
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	31

6.1	INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI	31
6.2	POLYPROPYLEN	32
6.2.1	Vlastnosti.....	32
6.2.2	Využití.....	32
6.2.3	Polypropylen plněný skelným vláknem	33
7	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	34
7.1	POUŽITÉ STATISTICKÉ VELIČINY.....	34
7.2	ZATÍŽENÍ 0,5 N.....	35
7.3	ZATÍŽENÍ 5 N.....	41
8	DISKUSE VÝSLEDKŮ	47
8.1	POLYPROPYLEN	47
8.2	POLYPROPYLEN PLNĚNÝ SKELNÝMI VLÁKNY	49
	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	53
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
	SEZNAM TABULEK.....	59
	SEZNAM PŘÍLOH.....	60

ÚVOD

Polymerní materiály se staly nedílnou součástí našich životů. S jejich rozšířením se také zvýšily požadavky na tyto materiály. Hledají se různé modifikace, které mají zlepšit požadované vlastnosti polymerů, jakou je například tvrdost.

Jednou z možností je modifikace polymerních materiálů pomocí záření beta. Ozařováním se u mnoha druhů polymerů spustí proces síťování, což je chemický proces, díky kterému se jednotlivé molekuly mezi sebou navzájem spojí, čímž dochází ke změně mechanických, chemických a teplotních vlastností modifikovaného materiálu. Výhodou je také možnost modifikace požadovaných vlastností pomocí zvolené dávky záření.

Tvrdost patří mezi významnou mechanickou vlastnost materiálu. Zkoušky tvrdosti jsou v praxi velmi používané zejména díky svojí rychlosti a jednoduchosti provedení. Tyto zkoušky neporušují zkoušený materiál a jen nepatrně ovlivní malý objem na jeho povrchu. Tvrdost také velmi často slouží jako výchozí hodnota pro odhad dalších mechanických vlastností.

Rozvoj měření tvrdosti je datován do první poloviny 20. století, kdy vznikly metody měření tvrdosti podle Brinella, Rockwella nebo Vickerse. Tyto metody jsou používány dodnes. S rostoucími nároky na materiály a požadavky na miniaturizaci měřících přístrojů, bylo nutné přijít s novými metodami měření tvrdosti. Dalším důvodem pro rozvoj nových metod, byl požadavek na měření tvrdosti tenkých vrstev materiálu, které nebylo možno posuzovat pomocí standartních metod, jelikož výsledky těchto zkoušek nebyly objektivní. Díky těmto požadavkům byly vytvořeny nové metody pro měření mikrotvrdosti a nanotvrdosti.

Mezi nejpoužívanější metody zkoumání mikrotvrdosti patří metoda DSI (Depth Sensing Indentation), neboli Instrumentovaná zkouška tvrdosti. Díky možnosti napojení měřícího přístroje na PC jsou průběhy zkoušek ihned zaznamenány současně s vyhodnocením některých materiálových parametrů, jakými jsou například elastický modul, lomová houževnatost, vtiskové tečení a práce vynaložená na vtisk.

Cílem bakalářské práce je zjistit, jak záření beta ovlivňuje mechanické vlastnosti vybraných polymerních materiálů. Konkrétně byly zkoumány vlastnosti neplněného polypropylenu a polypropylenu plněného skelnými vlákny.

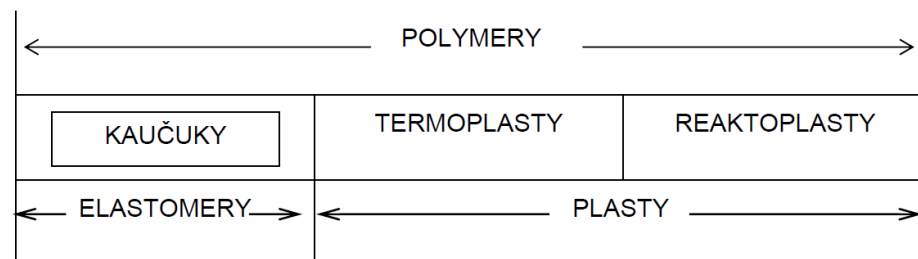
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY A JEJICH ROZDĚLENÍ

Polymery jsou chemické látky neobvyklé šíře vlastností, obsahující ve svých obrovských molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, často dusíku, chloru a jiných prvků. Polymery jsou ve formě výrobku prakticky v tuhém stavu, ale v určitém stádiu zpracování ve stavu v podstatě kapalném, dovolujícím většinou za zvýšené teploty a tlaku, udělit budoucímu výrobku nejrůznější tvar podle předpokládaného použití. [1]

1.1 Dělení polymerů z hlediska jejich chování za běžné teploty

Polymery dělíme do dvou základních skupin. První je skupina elastomerů, pod kterou můžeme řadit kaučukové materiály. Druhou skupinu tvoří skupina plastů, pod kterou řadíme termoplasty a reaktoplasty.



Obr. 1 Dělení polymerů [1]

1.1.1 Elastomery

Elastomer je, jak název napovídá, vysoce elastický polymer, který můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení, přičemž deformace je převážně vratná. Nejpočetnější podmnožinou elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vyrábí pryž. [1]

1.1.2 Plasty

Plasty jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. [2]

Termoplasty jsou plasty, které mají schopnost opakovaně ohřevem měknout a ochlazením tuhnut v teplotním intervalu, charakteristickém pro daný plast. [3]

Reaktoplasty procházejí při zpracovatelském procesu chemickou reakcí a účinkem tepla, záření nebo síťovacích činidel vytvářejí husté, prostorově zesíťované struktury, v nichž jsou původní molekuly vzájemně pospojovány kovalentními vazbami. Tento proces se

nazývá vytvrzování. Reaktoplast je ve vytvrzeném stavu netavitelný a nerozpustný. Recyklace reaktoplastů je proto obtížnější než u termoplastů a vyžaduje jiné postupy. [6]

Rozdělení plastů dle použití:

Komoditní plasty – nejvíce rozšířené, vyráběny ve velkých objemech (PVC, PP, PS).

Konstrukční plasty – schopné vydržet konstrukční namáhání, mají vysokou pevnost, tuhost a houževnatost (PA, POM, ABS).

Speciální plasty – mají vlastnosti konstrukčních plastů, vysokou chemickou odolnost a jsou odolné i při vysokých teplotách.

1.2 Rozdělení dle uspořádání nadmolekulární struktury

Podle nadmolekulární struktury (podle stupně uspořádanosti), kdy nadmolekulární struktura je nadřazena makromolekulám, se polymery dělí na:

Amorfni polymery, kde makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Patří sem např. PS, PMMA, apod. Jsou průhledné, charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností a modulem pružnosti.

Krystalické (semikrystalické) polymery, které vykazují určitý stupeň uspořádanosti. Ten se označuje jako stupeň krystalinity (pohybuje se od 40% do 90%) a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí uložených mezi oblastmi amorfními. Nemůže nikdy dosáhnout 100%, proto se krystalické polymery označují jako semikrystalické. Patří sem např. PE, PP, PA, PTFE, POM, atd. Jsou mléčně zakalené, index lomu je větší a jsou charakterizovány houževnatostí a pevností materiálu. Modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Použitelnost semikrystalických polymerů je do teploty tání T_m . [4]

1.3 Rozdělení dle uspořádání makromolekulárních řetězců

Tvar makromolekul je dán funkcí monomerů, která rozhoduje o možnosti vzniku makromolekul lineárních nebo zesíťovaných. Rovněž reakční podmínky (teplota, tlak) mají vliv na to, zda při polymeraci vznikne polymer lineární, rozvětvený nebo síťovaný. [2]

Lineární polymer se skládá z jednotlivých monomerů, které jsou seřazeny vedle sebe a vytváří řetězec.

Rozvětvený polymer obsahuje hlavní řetězec, na kterém jsou navázány boční větve.

Síťovaný polymer obsahuje příčné vazby, které spojují sousední řetězce.

1.4 Rozdělení podle původu

Přírodní polymery vznikají v rostlinách či v živočišných organismech složitými biochemickými procesy (např. bílkoviny, polysacharidy, nukleové kyseliny).

Syntetické polymery se vyrábějí z jednoduchých organických sloučenin reakcemi, při nichž se velký počet molekul výchozích látek spojuje v makromolekulu. [5]

2 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Ionizující záření je tok hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření, které mají schopnost ionizovat atomy prostředí nebo excitovat jejich jádra. Vzniká jako průvodní jev jaderných procesů (u rentgenového záření procesů, které se odehrávají v elektronovém obalu atomů). Při těchto procesech se dostává jádro (nebo obal) atomu do excitovaného stavu a stává se energeticky nestabilní. Stabilní stav získá právě vyzářením energie ve formě částic nebo fotonů elektromagnetického záření. [18]

Zdroje ionizujícího záření mohou být radionuklidy (přírodní nebo umělé) nebo generátory (RTG lampa, urychlovače apod.). Radionuklidy mají nestabilní atomová jádra, rozpadají se a vyzářují ionizující záření. [17]

Přímo ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi (elektrony, pozitrony, protony, částicemi α , β), které mají dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby mohly vyvolat ionizaci.

Nepřímo ionizující záření zahrnuje nenabitě částice (fotony, neutrony), které samy prostředí neionizují, ale při interakcích s prostředím uvolňují sekundární, přímo ionizující částice. Ionizace prostředí je pak způsobena těmito sekundárními částicemi. [18]

2.1 Veličiny charakterizující působení záření na látku

2.1.1 Dávka

Je energie záření absorbována v hmotnostní jednotce ozařované látky. Označuje se písmenem D . Jednotkou dávky je gray (Gy). Dávka 1 Gy tedy znamená, že v jednom kilogramu ozařované látky se absorbuje energie záření, o velikosti 1 J. Dříve používaná jednotka byla rad, přičemž $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$. [17]

2.1.2 Dávkový příkon

Udává, jak rychle se dávka mění. Je definován jako změna dávky za jednotku času. Označuje se \dot{D} a jeho jednotka je $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$. [17]

2.1.3 Energie

Kinetická energie, kterou získává elektron při průchodu potenciálním rozdílem 1 V, ve vakuu. Jednotkou je elektronvolt (eV). [19]

$$1\text{eV} = 1,602177 \cdot 10^{-19}\text{J} \quad (1)$$

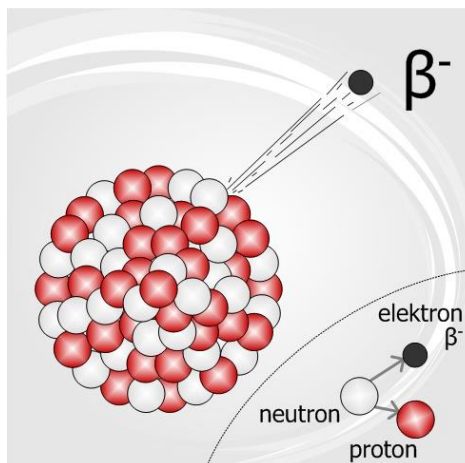
2.2 Základní druhy záření

V průmyslové praxi se aplikuje ionizační záření na polymery nejčastěji ve formě beta a gama. [19]

2.2.1 Záření β

Záření beta přirozených radioaktivních prvků je složeno ze záporných elektronů, proto jej přesněji označujeme jako β^- , abychom jej odlišili od záření beta některých umělých radioaktivních nuklidů, složených z kladných pozitronů β^+ . Tyto částice jsou vysílány radioaktivními jádry prvků při beta rozpadu. Pohybují se velmi rychle, rychlostí dosahující 99% rychlosti světla. Nesou kladný nebo záporný náboj a jejich pohyb může být ovlivňován elektrickým polem. Jejich pronikavost je větší než u alfa částic a mohou pronikat materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou. K jejich zastavení stačí vrstva vzduchu silná 1m nebo kovu o šířce 1mm. [20]

Záření β má spojité energetické spektrum, to znamená, že obsahuje částice s energiemi od nuly až po určitou maximální energii, která je pro radionuklid charakteristická. Hodnoty maximální energie u běžně používaných β zářičů činí desítky keV až jednotky MeV. [18]



Obr. 2 Záření beta [22]

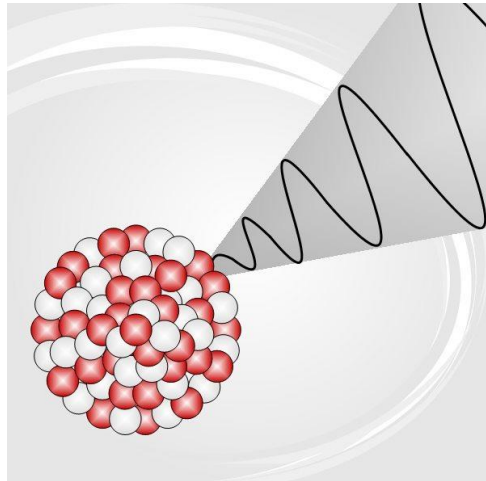
2.2.2 Záření γ

Záření gama je vysoce energetické elektromagnetické záření vznikající při radioaktivních a jiných jaderných a subjaderných dějích. [21]

Záření γ má výrazný kvantový ráz, takže se projevuje jako proud částic (fotonů γ). Záření γ neexistuje samostatně, ale vždy provází jaderné děje, při nichž vzniká záření α nebo β .

Zdrojem záření γ je jádro izotopu, který právě vznikl přeměnou radionuklidu. Toto jádro má v okamžiku vzniku vyšší energii (excitované jádro). V krátké době (řádově 10^{-13} s) přechází do základního stavu a tento přechod je spojen s vyzářením fotonu záření γ . [22]

Záření gama má čárové spektrum, to znamená, že daný radionuklid vyzařuje pouze fotony s určitými energiemi, které jsou pro jeho přeměnu charakteristické. U prakticky používaných zdrojů záření gama činí jeho energie desítky keV až jednotky MeV. [18]



Obr. 3 Záření gama [22]

3 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Tvrdot je nejčastěji definována jako mechanická vlastnost vyjadřující odpor materiálu proti vnikání geometricky definovaného vnikajícího tělesa (indentoru) při dané teplotě. [7]

Zkoušky tvrdosti jsou v praxi velmi často používané pro svoji jednoduchost a rychlost provedení. Jsou vhodné jak pro zkoušení malých vzorků, tak i pro rozměrné kusy. Neporuší zkoušený materiál a nepatrně ovlivní pouze malý objem na povrchu. Tvrdot velmi často slouží jako výchozí hodnota pro odhad ostatních mechanických vlastností.

V současné době existuje velké množství zkoušek tvrdosti, které lze podle použitého principu rozdělit na metody:

- **vrypové**, které jako nejstarší hodnotily rozměry vrypu, vytvořeného diamantovým tělesem určitého tvaru na vyleštěném povrchu (Martensova zkouška),
- **odrazové**, při kterých z určité výšky dopadá závaží definovaného tvaru a hmotnosti na povrch zkoušeného materiálu a hodnotí se výška odrazu (Shoreho zkouška),
- **vnikací**, kdy se do materiálu vtláčuje vhodný indentor předepsanou silou, vyhodnocují se tvar i rozměry vzniklého vtisku, podle kterých se stanovuje hodnota tvrdosti (Brinellova, Vickersova, Rockwellova zkouška).

Zkoušky tvrdosti lze dále rozdělit dle rychlosti působení zatěžující síly na **statické** (většina vnikacích metod) a **dynamické** (odrazová, Poldi kladívko). [3]

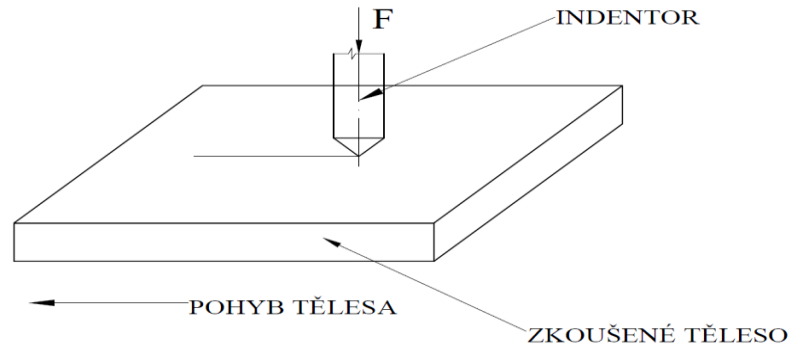
3.1 Vrypové zkoušky tvrdosti

Zkoušení tvrdosti kovů vrypem je založeno na myšlence Mohsovy stupnice pro zkoušení minerálů. V této stupnici je seřazeno 10 nerostů, z nichž každý následující je schopen vyrýt do všech předcházejících nerostů vryp. Citlivost této stupnice je však velmi malá, proto se u kovů a jejich slitin určuje tvrdost na základě šířky vytvořeného vrypu. [9]

3.1.1 Martensova zkouška tvrdosti

K určování této tvrdosti se používá přístroj, který zavedl Martens a pracuje na následujícím principu. Po vyhlazené ploše zkoušeného kovu pojíždí diamantový kužel s vrcholovým úhlem 90°, který lze zatížit silou, až 19,8 N. Vytvořený vryp se měří pomocí optického mikroskopu. Číslem tvrdosti dle Martense je zatížení, které vytvoří vryp šířky 0,01 mm. [9]

Mírou tvrdosti může být také šířka vrypu, provedeného vždy stejným zatížením. V technické praxi se vrypová zkouška tvrdosti málo používá, není normalizovaná. [11]



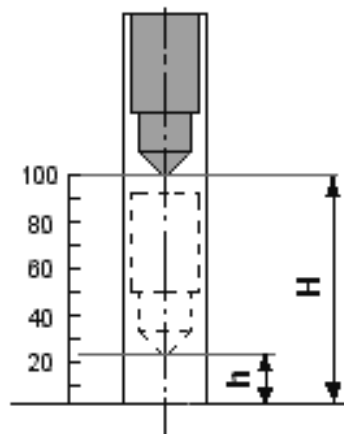
Obr. 4 Princip vrypové zkoušky

3.2 Odrazové zkoušky tvrdosti

3.2.1 Shoreho zkouška

Je založena na odrazu standardního tělesa tvaru válečku zakončeného kulovitě zabroušeným diamantem, které padá z určité výšky na povrch měřeného materiálu. Tvrdoměr se nazývá Shoreho skleroskop a má stupnici rozdělenou na 140 dílků. Tvrdost se určuje z dosažené výšky odrazu válečkového tělesa od měřeného povrchu. [11]

U moderních přístrojů pro odrazové dynamické zkoušky tvrdosti se používají tělíska o jiném tvaru i hmotnosti než u metody původní. K udělení počáteční energie se využívá buď energie pružiny, nebo energie elektromagnetického pole. Vyhodnocení je prováděno elektronicky s možností přepočtu na jiné stupnice tvrdosti. [18]



Obr. 5 Shoreho zkouška [7]

3.3 Vnikací zkoušky tvrdosti

3.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Tvrdot podle Brinella se zjišťuje vtačováním ocelové kalené kuličky o průměru D do zkušebního tělesa silou F , která směřuje kolmo k povrchu tělesa po stanovenou dobu. Následně se po odlehčení změří průměr vtisku d . Průměr D bývá 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Průměr kuličky závisí na tloušťce měřeného materiálu. Platí, že minimální tloušťka materiálu je desetinásobek hloubky vtisku. [8]

Po provedení zkoušky je třeba změřit průměr nebo hloubku vtisku. Měření průměru je pomocí měřicího mikroskopu, tzv. Brinelovy lupy, možné až na setiny mm, kdežto přesné změření hloubky je mnohem obtížnější. Při sériových zkouškách je měření mikroskopem zdlouhavé, proto jsou tvrdoměry konstruovány tak, že lze tuto hloubku odečíst přímo na přístroji. S ohledem na možnost vytvoření valu v okolí vtisku je tento postup vhodný pouze pro poměrné stanovení tvrdosti. Pro přesné určení hodnoty tvrdosti je třeba vycházet z průměru vtisku. [9]

Tvrdot podle Brinella je dána vztahem:

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

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3)$$

F – zatěžující síla

S – povrch vtisku vytlačeného kulového vrchlíku

D – průměr ocelové kuličky

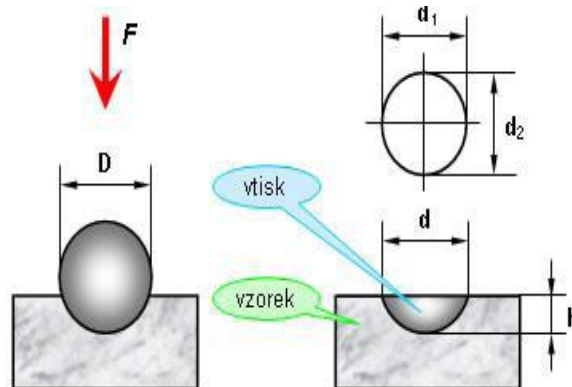
d_1, d_2 – rozměry vtisku

d – průměrná hodnota vtisku

Označení tvrdosti se skládá ze značky tvrdosti HB a k ní připojených údajů podmínek zkoušky, tj. průměru kuličky D , síly F a doby zatížení t . Tyto údaje jsou od sebe odděleny lomítkem (např. 320 HB 5/7500/30). Pro nejběžnější podmínky tj. HB 10/30000/10 použijeme jen označení 210 HB. [8]

Při této zkoušce se používá velké zatížení, a tedy velkých vtisků, které umožňují přesnější měření. Na druhé straně však mohou velké vtisky znehodnotit funkční povrch výrobku.

Zkouška nevyžaduje velmi čistě upravený povrch a není vysoce citlivá na přesné dodržení zkušebních podmínek. [11]



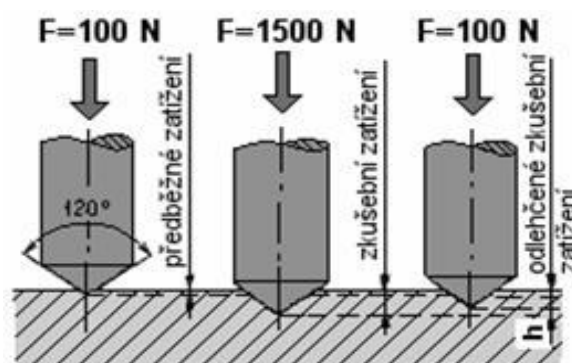
Obr. 6 Brinellova zkouška [10]

3.3.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

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

Kužel má vrcholový úhel 120° a poloměr kulové části 0,2 mm (HRA, HRC). Kulička má průměr 1,5875 mm (HRB). [8]

Diamantový kužel nebo ocelová kulička, dotýkající se povrchu zkoušeného předmětu, se nejprve předběžně zatíží silou 100 N (výchozí poloha pro měření hloubky vtisku). Potom se pozvolna zvětšuje zatěžující síla, tak aby se za 3 až 6 sekund dosáhlo zatížení předepsané normou (např. předběžné zatížení silou 100 N + zkušební zatížení silou 1400 N = celkové zatížení silou 1500 N). Pak se zatěžující síla opět zmenšuje na 100 N a v tomto stavu se zjistí přírůstek hloubky vtisku, který nastal proti výchozí poloze při 100 N. [7]



Obr. 7 Rockwellova zkouška tvrdosti [8]

Tvrдость podle Rockwella se vyjadřuje čísly určujícími hodnotu tvrdosti a písmeny HR s uvedením použité stupnice tvrdosti.

Př.: 60 HRC...tvrdost 60 podle Rockwella, stanovená stupnicí C. [11]

Výhodou této zkoušky je, že hodnotu tvrdosti přečteme na číselníku tvrdoměru, nemusíme nic přepočítávat, ani hledat v tabulkách. Další předností této zkoušky jsou velmi malé vtisky, které nejsou téměř vidět, a také pokud používáme diamantový kužel, můžeme měřit tvrdost u velmi tvrdých materiálů. [12]

3.3.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Vickersova zkouška je založena na stejném principu jako zkouška Brinellova, jen místo kuličky se do materiálu vtlačuje diamantový vyleštěný pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Tvrдость podle Vickerse HV je tvrdost vyjádřená jako poměr zkušebního zatížení F k ploše povrchu vtisku. [11]

Tvrдость podle Vickerse je dána vztahem:

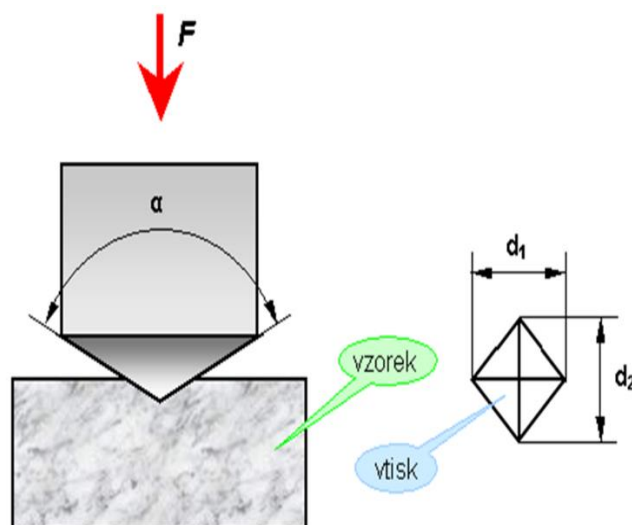
$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2} \quad (4)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (5)$$

F – síla vtlačování

d_1, d_2 – rozměry vtisku

d – průměrná hodnota vtisku



Obr. 8 Vickersova zkouška [16]

Pro praktickou potřebu používáme tabulek, kde podle délky úhlopříčky a použité síly F je uvedena odpovídající tvrdost.

Zkušební zatěžující síla bývá od 10 do 1000 N. Doba zatížení se volí od 10 do 180 s. [7]

Normální podmínky zkoušky jsou: $F = 294$ N, doba působení od 10 do 15 s. V tomto případě se zjištěná tvrdost označuje čísly, charakterizujícími hodnotu tvrdosti a písmeny HV.

Př.: 420 HV...tvrdost 420 podle Vickerse, stanovená za normálních podmínek zkoušky. [11]

Při měření za jiných podmínek zapisujeme tvrdost například:

640 HV 294/20...tvrdost podle Vickerse byla stanovená 640, při zkušebním zatížení 294 N, působícím po dobu 20 s. [13]

Výhodou této metody je, že naměřené hodnoty tvrdosti jsou velmi přesné. Vtisky jsou poměrně malé, takže ani čistě obrobená plocha se příliš nepoškozuje. [9]

4 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI DSI

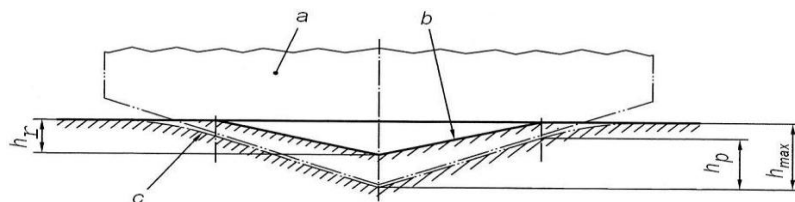
Jedním z hlavních důvodů pro vznik nové indentační techniky byla snaha o zjištění mechanických vlastností tenkých vrstev. Tradiční zkoušky mikrotvrdomosti respektive přístroje nebyly schopny vytvořit tak malé zatížení, aby nebyl samotnou indentací ovlivněn i substrát, na němž byla vrstva nanášena. Požadavkem bylo, aby celková hloubka vtisku byla rovna 10% z celkové hloubky vrstvy. Pokud by se vytvořil vtisk dle daného požadavku, nebylo by možné jeho rozměry v klasickém tj. optickém mikroskopu přesně změřit. Rozměry vtisku by se musely proměřit elektronovým mikroskopem, což práci prodlužovalo a znesnadňovalo. [14]

4.1 Princip zkoušky

Principem metody je, že měřicí přístroj detekuje současně okamžitou změnu hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu v závislosti na plynulém nárůstu respektive poklesu zatížení, v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Grafickým zpracováním dat vzniká charakteristická indentační křivka zatížení. Díky možnosti napojení měřicího přístroje na PC jsou průběhy zkoušek ihned zaznamenány současně s vyhodnocením některých materiálových parametrů. [14]

Použité tvary a materiály vnikacího tělesa, které je z tvrdšího materiálu než materiál zkoušený, mohou být následující:

- diamantové těleso se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° (Vickersův jehlan),
- diamantový jehlan s trojúhelníkovou základnou (Berkovičův jehlan),
- tvrdokovová kulička,
- diamantové sférické vnikací těleso. [15]

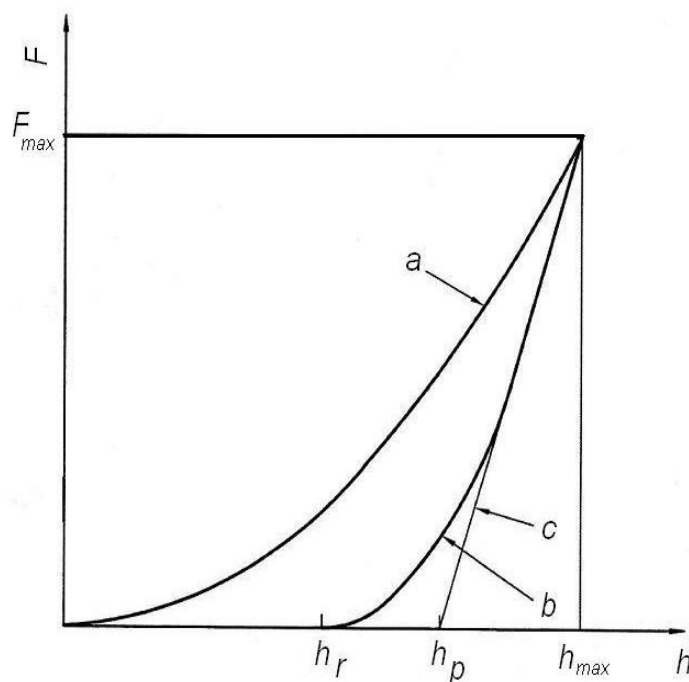


Obr. 9 Schématické znázornění příčného řezu vtisku [15]

- a) indentor; b) povrch zbytkového plastického vtisku ve zkušební tělese;
- c) povrch zkušební tělesa při maximální hloubce vtisku a maximálním zkušební zatížení

4.2 Indentační křivky

Hlavním cílem indentačních mikro a nanotechnik je určení mikro a nanotvrdomosti a současně elastického modulu zkoušeného vzorku. Experimentální data se získávají, když působící zatížení narůstá ze své nulové hodnoty do svého maxima a poté klesá z maximální hodnoty zpět do nuly. Jestliže se indentovaný vzorek plasticky deformuje, zůstává v jeho povrchu trvalý vtisk. Velikost vzniklého vtisku (a tedy projekční plocha) je příliš malá na přesné měření optickými technikami, tak jako je tomu u konvekčních zkoušek tvrdosti. Geometrie indentoru a jeho hloubka průniku do materiálu tak poskytují nepřímou informaci o velikosti kontaktní plochy při plném zatížení, ze které se vypočte průměrný kontaktní tlak a také tvrdost. Při odlehčování dochází k tzv. zotavování vtisku, což znamená, že se materiál „snaží“ dostat do svého původního tvaru uvolňováním elastických deformací. Zejména u kovů však k zotavení nikdy nedojde v plné míře díky již vzniklé plastické deformaci. Analýza počáteční části elastické relaxace v průběhu odlehčování tak umožňuje určit elastický modul zkoumaného materiálu. Tvary indentačních křivek, respektive poddajnosti jsou si bez ohledu na použitý indentor velice podobné. [14]



Obr. 10 Indentační křivka [15]

- a) zátěžová křivka; b) odlehčovací křivka; c) tečna ke křivce materiálu b v F_{max} ;
 h_r – plastická hloubka po odlehčení zkušebního zatížení, tj. zbytková hloubka vtisku; h_p – redukovaná hloubka vtisku; h_{max} – maximální hloubka vtisku při F_{max}

4.3 Zpracování dat

4.3.1 Vtisková tvrdost H_{IT}

Charakterizujeme ji jako míru odporu k trvalé deformaci nebo poškození.

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \quad (6)$$

F_{max} – maximální zatěžující síla

A_p – průmět kontaktní plochy vnikacího tělesa s tělesem zkušebním [15]

4.3.2 Tvrdost podle Vickerse H_{VIT}

Podíl maximální zatěžující síly k ploše povrchu vnikacího tělesa.

$$H_{VIT} = \frac{F_{max}}{9,81 \cdot A_p} \quad (7)$$

F_{max} – maximální zatěžující síla

A_p – průmět kontaktní plochy vnikacího tělesa s tělesem zkušebním [15]

4.3.3 Vtiskový modul E_{IT}

K výpočtu vtiskového modulu používáme směrnicí tečny, která dále slouží pro výpočet tvrdosti H_{IT} .

$$E_{IT} = \frac{1 - (v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (v_i)^2}{E_i}} \quad (8)$$

E_r – redukovaný modul vtiskového kontaktu

E_i – modul vnikacího tělesa

v_s – Poissonův poměr zkušebního tělesa

v_i – Poissonův poměr vnikacího tělesa [15]

4.3.4 Vtiskové tečení C_{IT}

Jestliže se při konstantním zatížení měří hloubka vtisku, může se vypočítat relativní změna hloubky vtisku.

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (9)$$

h_1 – hloubka vtisku v milimetrech v čase (t_1), kdy je dosaženo zkušebního zatížení

h_2 – hloubka vtisku v milimetrech v čase (t_2) výdrže na konstantní úrovni zkušebního zatížení [15]

4.3.5 Deformační práce

Celková práce W_{total} je spotřebována na deformační práci plastickou W_{plast} a deformační práci elastickou (pružnou) W_{elast} . Při zatížení určujeme plastickou deformační práci a při odlehčování elastickou deformační práci. [15]

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \quad (10)$$

Koeficient zpětné relaxace η_{IT} :

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 \quad (11)$$

4.4 Faktory, ovlivňující měření

Na rozdíl od konvenčních zkoušek tvrdosti (pomineme-li velikost hloubky průniku indentoru do materiálu) je podstatou metody DSI nepřímé určení tvrdosti z přesného určení hloubky průniku indentoru do měřeného vzorku. V praxi je však přesné změření hloubky a zatížení obtížné a výsledky tak bývají ovlivněny chybami. Mezi zřejmé chyby patří přesné určení počátku vnikání hrotu indentoru do materiálu, tj. prvotní kontakt a s tím spjatý problém určení nulové hloubky při zatěžování. Chybné a nepřesné výsledky mohou být způsobeny náhlou změnou podmínek měření. Navíc je nutné brát na zřetel způsob, jakým byl vzorek připravován, protože samotná příprava značně ovlivňuje povrchové vlastnosti materiálu a tím i výsledky zkoušky. Mezi nejzávažnější jevy, ke kterým dochází při indentaci, patří vztažení okrajů vtisku (sink-in), nakupení materiálu na okraj vtisku (pile-up) a efekt označovaný jako ISE (Indentation Size Effect), vliv velikosti vtisku. [14]

Z výše řečeného plyne, že lze faktory ovlivňující měření rozdělit do dvou skupin:

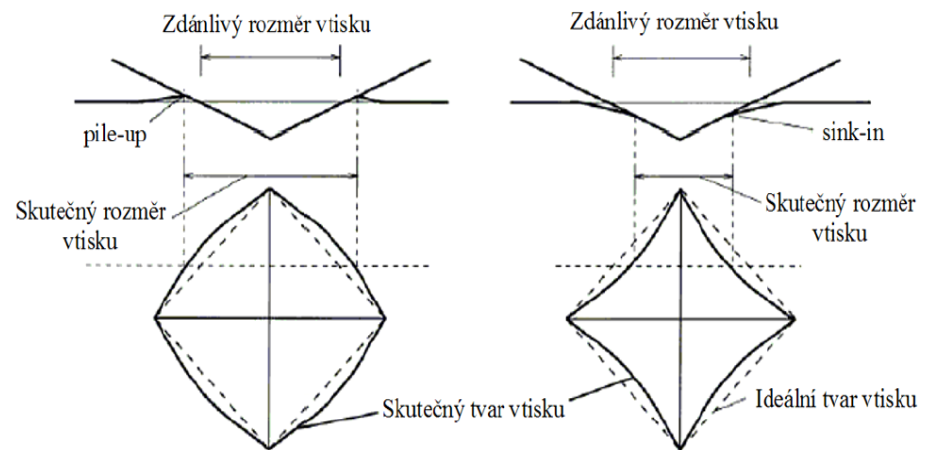
1. vliv vlastností měřicího přístroje,
2. vlastnosti povrchu vzorku měřeného materiálu.

Do první skupiny vlivů patří faktory:

- kolísání teploty (ovlivňuje přístroj i měřený vzorek),
- určení bodu prvního dotyku indentoru, tzv. nulová poloha,
- poddajnost, resp. tuhost měřicího přístroje,
- geometrie indentoru.

Druhá skupina je tvořena vlastnostmi materiálu a lze je jen stěží ovlivnit. Patří sem:

- tvar vtisku – nakupení materiálu (pile-up) a vtažení materiálu (sink-in),
- vliv velikosti vtisku tzv. ISE,
- povrchová hrubost měřeného vzorku,
- zbytková napětí. [14]



Obr. 11 Nakupení a vtažení materiálu [14]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je měření mechanických vlastností vybraných polymerů. Tyto polymery byly modifikovány pomocí záření beta. Pro získání požadovaných mechanických vlastností, byla využita Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI.

Postup při vypracování bakalářské práce:

- Vypracování literární studie na dané téma.
- Příprava zkušebních vzorků.
- Provedení experimentu.
- Vyhodnocení naměřených výsledků.

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

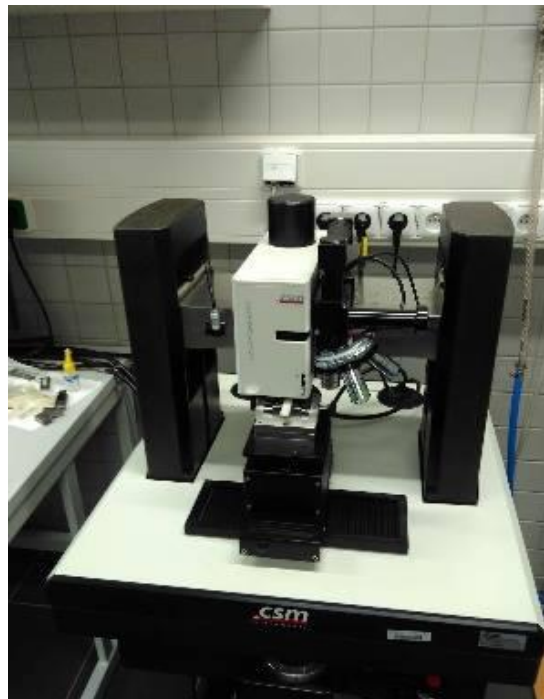
V praktické části bakalářské práce byly zkoumány mechanické vlastnosti neplněného polypropylenu a polypropylenu plněného 30% skelných vláken. Vzorky byly ozářeny dávkami 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy.

6.1 Instrumentovaná zkouška tvrdosti

Měření Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI bylo provedeno na přístroji, Micro Combi Tester. Zvolené parametry zkoušky:

- zatížení 0,5 N a 5 N,
- výdrž na maximálním zatížení 90 s,
- Poissonovo číslo – 0,3.

Jako indentor byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° (Vickersův indentor).



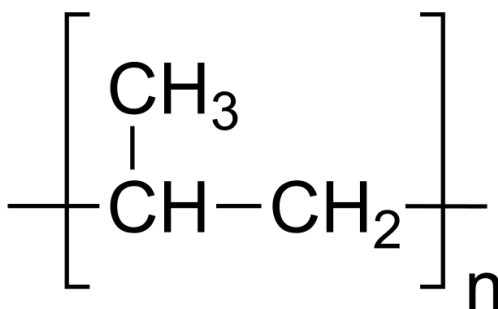
Obr. 12 Micro Combi Tester

6.2 Polypropylen

Polypropylen (PP) je jeden z ekonomicky nejdůležitějších termoplastických materiálů. Polypropylen je používán ve velmi široké škále aplikací, ať už jako průhledný materiál nebo zbarvený pigmenty (obaly na potraviny, tkaniny, automobilové součásti apod.). Vlastnosti polypropyleny jsou dány použitou polymerací a použitými katalyzátory. [23]

Podle molekulární struktury dělíme polypropylen na:

- ataktický,
- izotaktický,
- syndiotaktický.



Obr. 13 Strukturální vzorec PP [22]

6.2.1 Vlastnosti

Polypropylen je středně pevný a tuhý materiál, má lepší mechanické vlastnosti než PE. Jedná se o nepolární plast a obdobně jako polyetylen je odolný vůči polárním rozpouštědům, kyselinám, zásadám a solím. Jedná se o hořlavý plast. Nenavlhá, velmi dobře se dá barvit a lepit. Teplota skelného přechodu u čistého PP je 0°C a teplota tání je 170 °C. Dá se modifikovat velkou řadou přísad, jakými jsou například plnidla (skelná vlákna) nebo kaučuk (modifikace používaná k výrobě nárazníků). [24], [25]

6.2.2 Využití

Z polypropyleny se vyrábějí různé předměty spotřebního průmyslu, jakými jsou např. fólie, misky, obalové materiály, vlákna, láhve a jiné duté předměty. Díky lepším mechanickým vlastnostem, příznivé ceně, možnosti modifikace přísadami nebo jinými polymery, je možné využití na součásti strojů a přístrojů ve strojírenství. Velké zastoupení má polypropylen v automobilovém průmyslu (reflektory, spoilery, klimatizační jednotky, mřížky chladiče apod.). [25]

6.2.3 Polypropylen plněný skelným vláknem

Skelná vlákna (GF – Glass Fiber) jsou nerozšířenější vláknové plnivo polymerních materiálů. Jsou to tenká vlákna s kruhovým průřezem o rozměru 3,5 – 24 μm . Při plnění plastů se používají vlákna vyráběná z E-skloviny (nejvíce využívaná) a S-skloviny (o 40-70% vyšší pevnost). V praxi se aplikuje 20 – 60% plnění.

Skelná vlákna mají stejné vlastnosti ve všech směrech, což se projevuje např. u modulu pružnosti, pevnosti v tahu nebo u součinitele teplotní délkové roztažnosti. Pevnost v tahu je vyšší než u většiny organických i anorganických vláken. Tepelné vlastnosti skelných vláken překonávají tepelné vlastnosti ostatních materiálů. Nedochází zde ani ke snížení hodnot mechanických vlastností při dlouhodobém namáhání při teplotě 250°C. [26]

7 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Pro každý vzorek bylo provedeno 10 měření a statistické vyhodnocení.

7.1 Použité statistické veličiny

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (12)$$

\bar{x} ...aritmetický průměr

n ...počet měření

x_i ... i-tá hodnota měřené veličiny

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (13)$$

s ...směrodatná odchylka

\bar{x} ...aritmetický průměr

n ...počet měření

x_i ... i-tá hodnota měřené veličiny

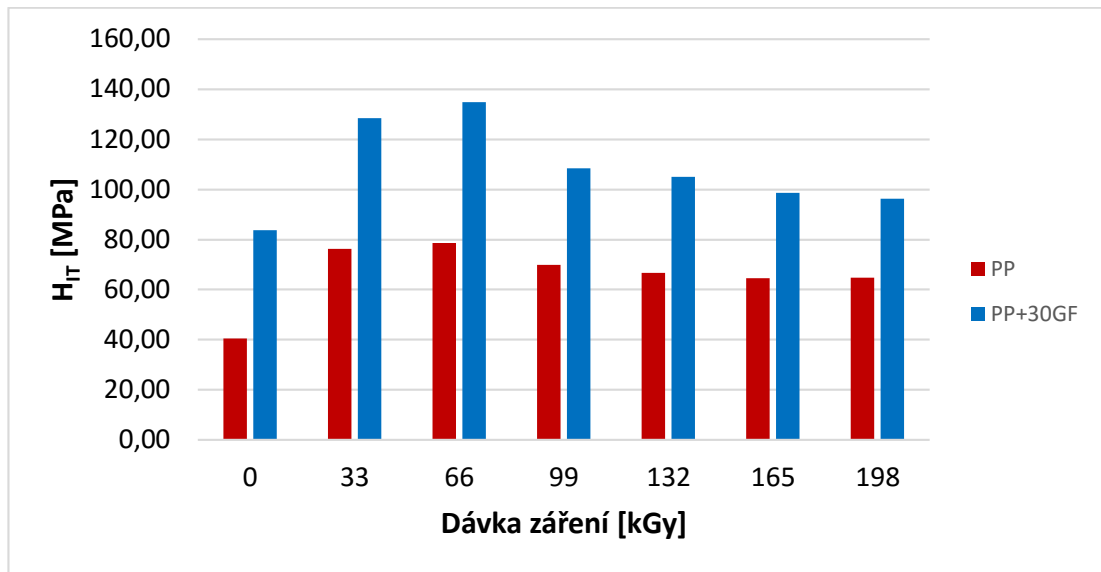
7.2 Zatížení 0,5 N

Tabulka 1 Naměřené hodnoty pro PP

		0 kGy	33 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
H_{IT} [MPa]	\bar{x}	40,43	76,33	78,61	69,79	66,63	64,51	64,67
	s	0,65	2,35	1,43	3,12	18,74	2,01	14,91
E_{IT} [GPa]	\bar{x}	0,81	1,38	1,44	1,30	1,21	1,23	1,21
	s	0,01	0,02	0,02	0,04	0,19	0,02	0,16
C_{IT} [%]	\bar{x}	12,83	11,56	11,59	12,11	13,10	11,60	13,58
	s	0,12	0,23	0,25	0,32	1,53	0,31	1,39
H_{VIT} [Vickers]	\bar{x}	3,82	7,20	7,42	6,59	6,29	6,09	6,10
	s	0,06	0,22	0,13	0,23	1,77	0,19	1,41
W_{elast} [μJ]	\bar{x}	1,93	1,50	1,50	1,54	1,63	1,60	4,52
	s	0,61	0,02	0,02	0,03	0,09	0,02	0,22
W_{plast} [μJ]	\bar{x}	3,68	2,48	2,50	2,63	3,06	2,79	9,03
	s	0,05	0,03	0,05	0,11	0,08	0,06	0,19
W_{total} [μJ]	\bar{x}	5,61	3,98	4,00	4,17	4,69	4,39	13,55
	s	0,08	0,05	0,07	0,14	0,16	0,07	0,40
η_{IT} [%]	\bar{x}	34,43	37,71	37,50	36,99	34,78	36,78	33,35
	s	0,07	0,18	0,23	0,50	0,81	0,35	0,69

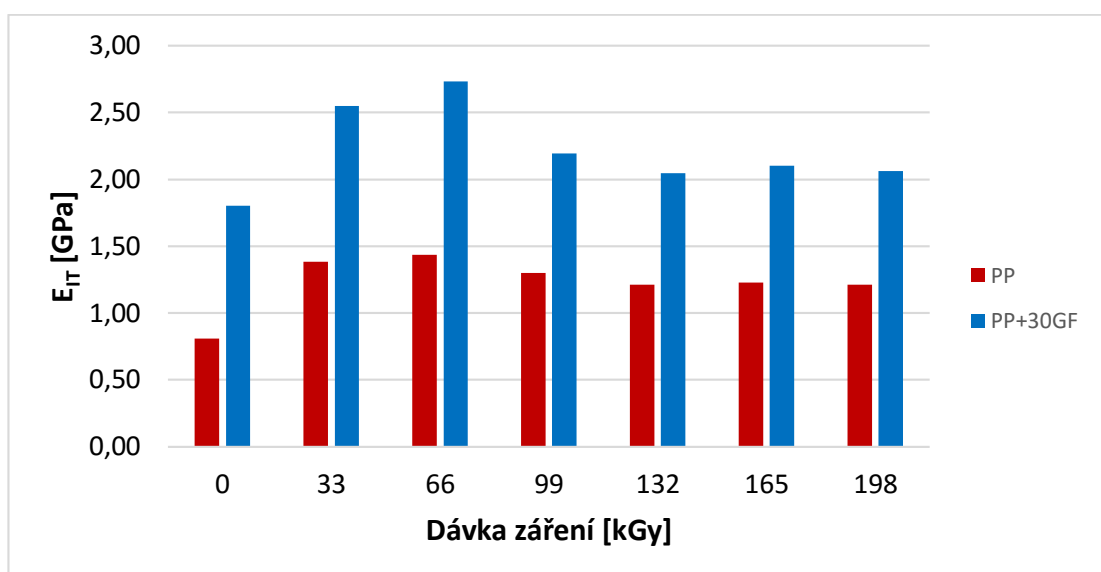
Tabulka 2 Naměřené hodnoty pro PP+30 GF

		0 kGy	33 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
H_{IT} [MPa]	\bar{x}	83,64	128,46	134,86	108,48	105,10	98,60	96,28
	s	7,94	9,25	15,29	11,47	12,32	8,62	6,52
E_{IT} [GPa]	\bar{x}	1,80	2,55	2,73	2,19	2,04	2,10	2,06
	s	0,21	0,26	0,27	0,36	0,35	0,35	0,18
C_{IT} [%]	\bar{x}	12,80	12,32	12,18	10,30	11,13	10,79	11,33
	s	0,98	2,26	0,85	1,25	0,94	1,11	1,58
H_{VIT} [Vickers]	\bar{x}	7,89	12,12	12,73	10,24	9,92	9,31	9,09
	s	0,75	0,87	1,44	1,08	1,16	0,81	0,61
W_{elast} [μJ]	\bar{x}	1,23	0,97	0,94	0,93	0,98	1,05	1,09
	s	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04	0,07	0,08
W_{plast} [μJ]	\bar{x}	2,95	2,26	2,16	2,37	2,40	2,43	2,68
	s	0,24	0,21	0,13	0,29	0,26	0,22	0,42
W_{total} [μJ]	\bar{x}	4,18	3,23	3,10	3,30	3,38	3,48	3,77
	s	0,26	0,22	0,16	0,30	0,29	0,27	0,49
η_{IT} [%]	\bar{x}	29,52	30,04	30,35	28,29	29,04	30,24	29,15
	s	1,76	1,89	1,25	2,47	1,44	1,40	2,00



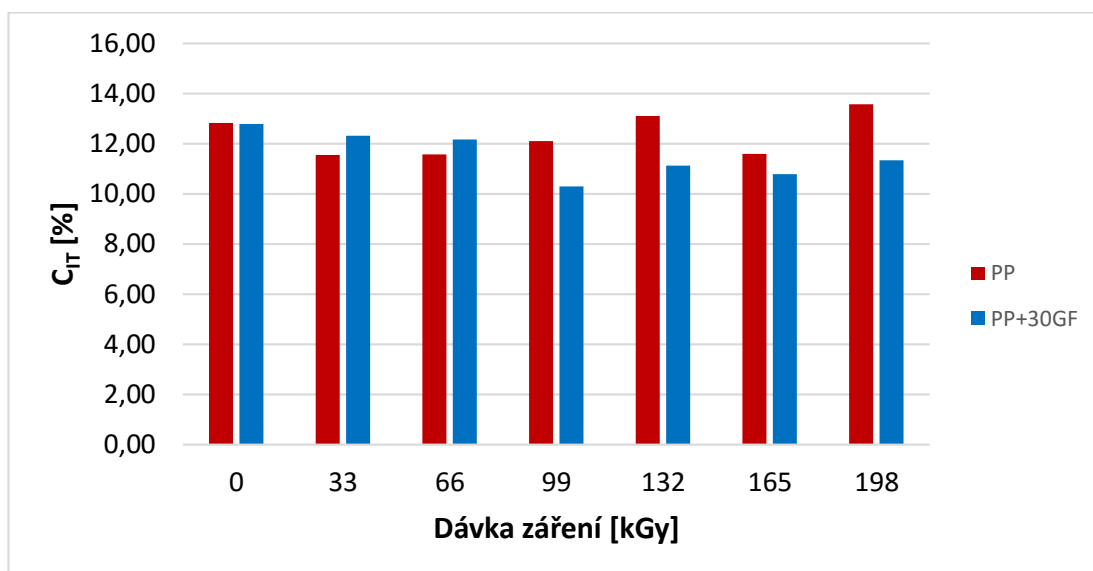
Obr. 14 Vtisková tvrdost

Vtiskovou tvrdost charakterizujeme jako míru odporu k trvalé deformaci nebo poškození. Polypropylen plněný skelnými vlákny má v celém rozsahu aplikovaných dávek záření, hodnoty vtiskové tvrdosti vyšší, než neplněný polypropylen. Z grafického srovnání obou materiálů můžeme také vidět, že nejmenší hodnoty vtiskové tvrdosti byly naměřeny při nulovém záření. Naopak nejvyšší dosažené hodnoty byly zjištěny při záření 66 kGy. Procentuální nárůst vtiskové tvrdosti mezi neozářeným vzorkem a vzorkem modifikovaným dávkou záření 66 kGy, činí u neplněného polypropylenu přibližně 94%. U plněného polypropylenu je procentuální nárůst mezi neozářeným vzorkem a vzorkem ozářeným dávkou 66 kGy, asi 61%.



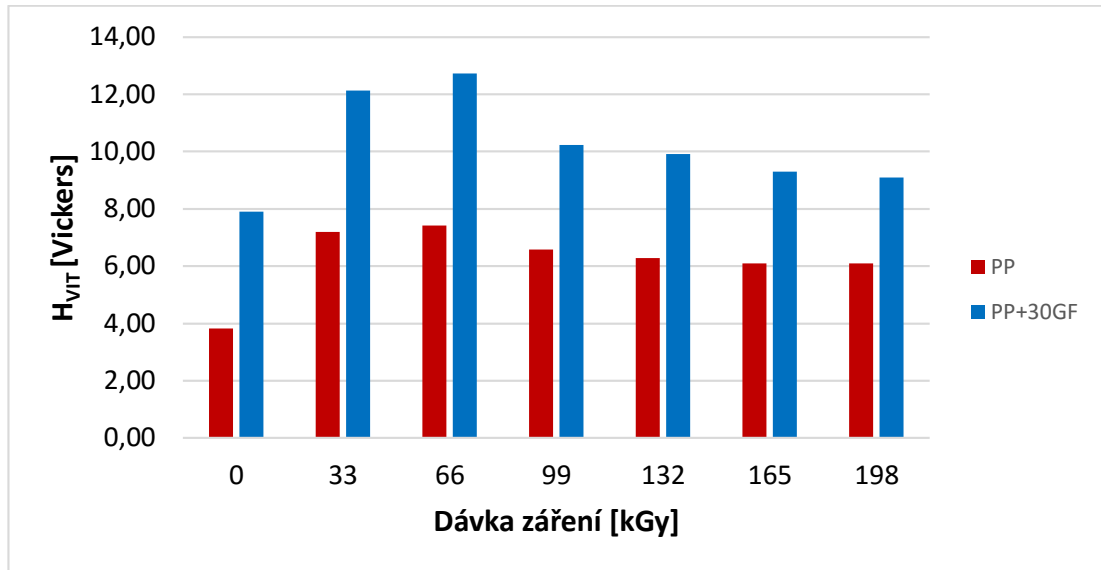
Obr. 15 Vtiskový modul

K výpočtu vtiskového modulu používáme směrnici tečny, která dále slouží pro výpočet tvrdosti. Při porovnání hodnot vtiskového modulu bylo zjištěno, že výsledky u plněného polypropylenu jsou opět vyšší, než u neplněného polypropylenu. Nejnížší hodnoty vtiskového modulu byly naměřeny u neozářených vzorků. Nejvyšší hodnoty vtiskového modulu byly zjištěny při ozáření dávkou 66 kGy. Procentuální rozdíl mezi neozářeným vzorkem a vzorkem modifikovaným dávkou 66 kGy, u neplněného polypropylenu činí přibližně 78%. U plněného propylenu je tento procentuální rozdíl asi 52%.



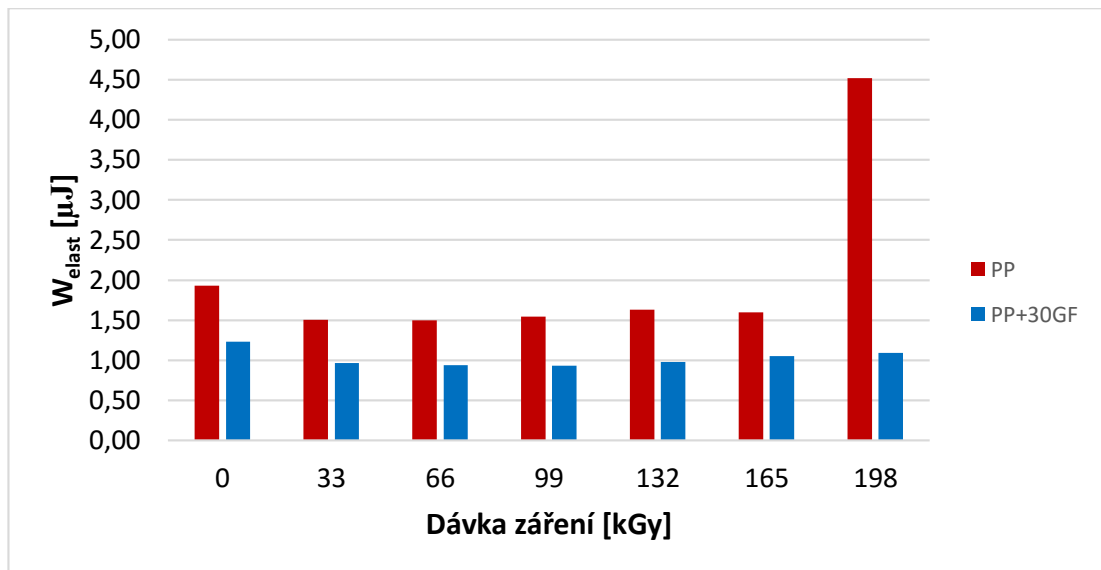
Obr. 16 Vtiskové tečení

Vtiskové tečení můžeme charakterizovat jako relativní změnu hloubky vtisku. Při srovnání výsledků vtiskového tečení, bylo dosaženo u obou materiálů velmi podobných výsledků. U neplněného polypropylenu bylo nejmenší hodnoty dosaženo při záření 33 kGy. Nejvyšší hodnota vtiskového tečení byla naměřena při ozáření dávkou 198 kGy. Procentuální rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou hodnotou vtiskového tečení, u neplněného polypropylenu činí přibližně 6%. U polypropylenu plněného skelnými vlákny, byla nejmenší hodnota zjištěna při ozáření dávkou 99 kGy. Největší hodnota vtiskového tečení byla dosažena u neozářeného vzorku. Procentuální pokles vtiskového tečení mezi neozářeným vzorkem a vzorkem modifikovaným dávkou záření 99 kGy, u plněného polypropylenu je přibližně 24%.



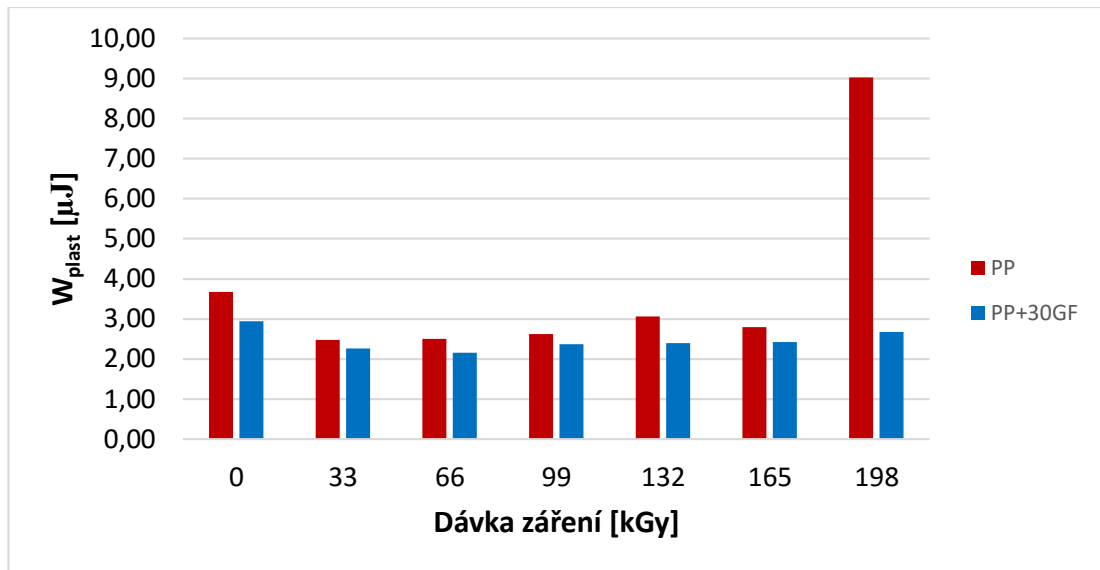
Obr. 17 Vickersova tvrdost

Tvrdość podle Vickerse charakterizujeme jako podíl maximální zatěžující síly k ploše povrchu vnikacího tělesa. Polypropylen plněný skelnými vlákny má v celém rozsahu dávek záření hodnoty vtiskové tvrdosti vyšší, než neplněný polypropylen. Nejnižších hodnot u obou materiálů bylo dosaženo u neozářených vzorků. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny při záření 66 kGy. U neplněného polypropyleny je procentuální nárůst mezi nemodifikovaným vzorkem a vzorkem ozářeným dávkou 66 kGy, asi 94%. U plněného polypropyleny činí nárůst mezi neozářeným vzorkem a vzorkem modifikovaným zářením beta, o dávce 66 kGy, přibližně 61%.



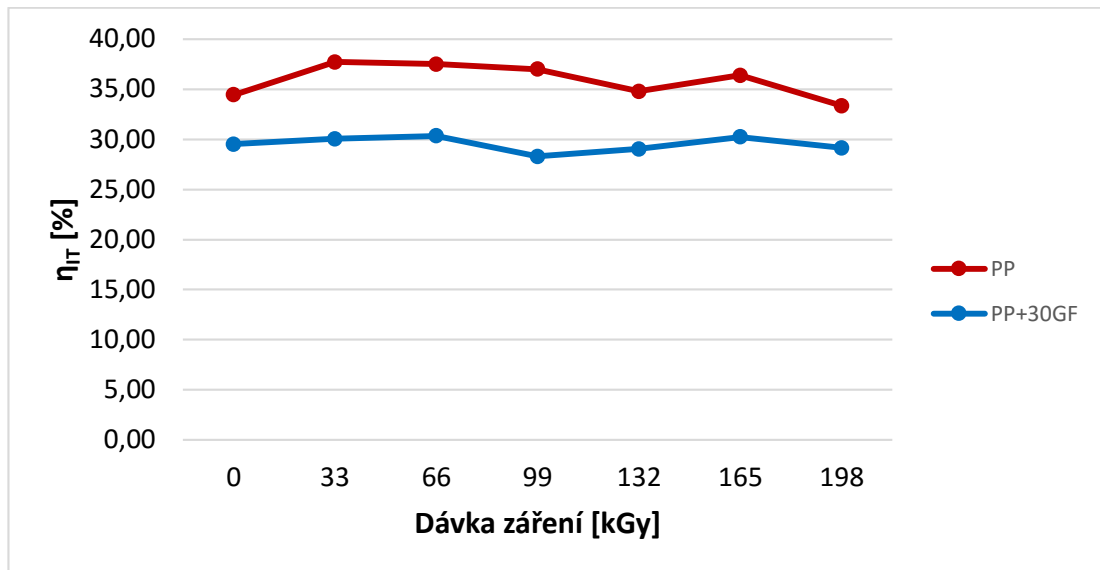
Obr. 18 Elastická deformační práce

Z grafického srovnání výsledků elastické deformační práce, bylo dosaženo vyšších hodnot u neplněného polypropylenu. Největší zjištěná hodnota elastické deformační práce u neplněného polypropylenu, byla dosažena při ozáření dávkou 198 kGy. Nejmenší naměřené hodnoty byly zjištěny u vzorků, které byly modifikovány dávkami 33 kGy a 66 kGy. U polypropylenu plněného skelnými vlákny bylo dosaženo nejvyšší hodnoty u neozářeného vzorku. Nejnížší hodnota byla naměřena při záření 99 kGy.



Obr. 19 Plastická deformační práce

Při porovnání hodnot plastické deformační práce, byly opět vyšší hodnoty naměřeny u neplněného polypropylenu. Nejvyšší hodnota plastické deformační práce byla zjištěna při ozáření dávkou 198 kGy. Nejnížší hodnota byla dosažena při záření 66 kGy. U plněného polypropylenu byla největší hodnota naměřena u neozářeného vzorku. Nejmenší hodnota byla zjištěna při záření 66 kGy.



Obr. 20 Koeficient zpětné deformace

U neplněného polypropylenu bylo dosaženo větších hodnot koeficientu zpětné deformace, než u plněného polypropylenu. Nejvyšší hodnota koeficientu zpětné deformace byla zjištěna při záření 33 kGy. Nejmenší hodnota byla naměřena při ozáření dávkou 198 kGy. Polypropylen plněný skelnými vlákny dosáhl nejvyšší hodnoty koeficientu zpětné deformace při aplikovaném záření 66 kGy. Nejnižší hodnota byla zjištěna při ozáření vzorku dávkou 99 kGy.

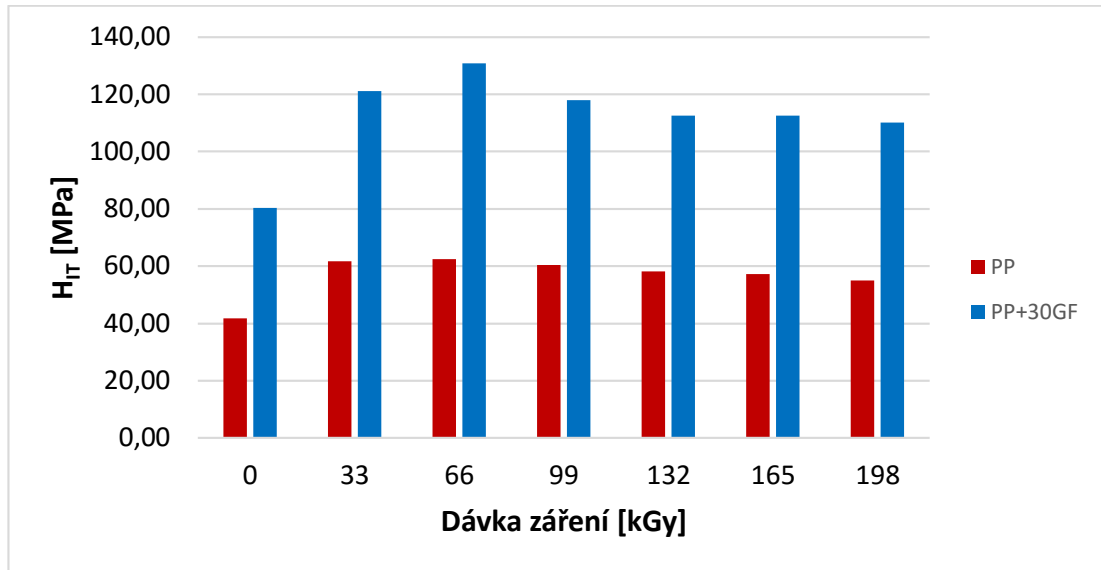
7.3 Zatížení 5 N

Tabulka 3 Naměřené hodnoty pro PP

		0 kGy	33 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
H_{IT} [MPa]	\bar{x}	41,68	61,62	62,42	60,49	58,16	57,20	55,03
	s	0,52	0,68	1,01	0,99	1,26	5,49	0,79
E_{IT} [GPa]	\bar{x}	0,88	1,23	1,28	1,16	1,25	1,19	1,16
	s	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,07	0,02
C_{IT} [%]	\bar{x}	12,68	11,88	12,05	13,09	12,00	12,79	12,15
	s	0,11	0,13	0,27	0,27	0,13	0,50	0,17
H_{VIT} [Vickers]	\bar{x}	3,93	5,82	5,89	5,71	5,49	5,40	5,19
	s	0,05	0,06	0,10	0,09	0,12	0,52	0,07
W_{elast} [μJ]	\bar{x}	56,90	48,79	47,41	45,87	47,51	48,78	49,38
	s	0,34	0,21	0,13	0,04	0,39	0,71	0,58
W_{plast} [μJ]	\bar{x}	112,84	94,01	93,53	85,31	96,93	100,54	98,78
	s	0,56	0,72	0,48	0,11	1,35	0,65	0,90
W_{total} [μJ]	\bar{x}	169,74	142,80	140,94	131,18	144,44	149,32	148,16
	s	0,87	0,76	0,46	0,15	1,72	1,34	1,47
η_{IT} [%]	\bar{x}	33,52	34,17	33,64	34,97	32,89	32,66	33,33
	s	0,08	0,20	0,15	0,17	0,16	0,19	0,06

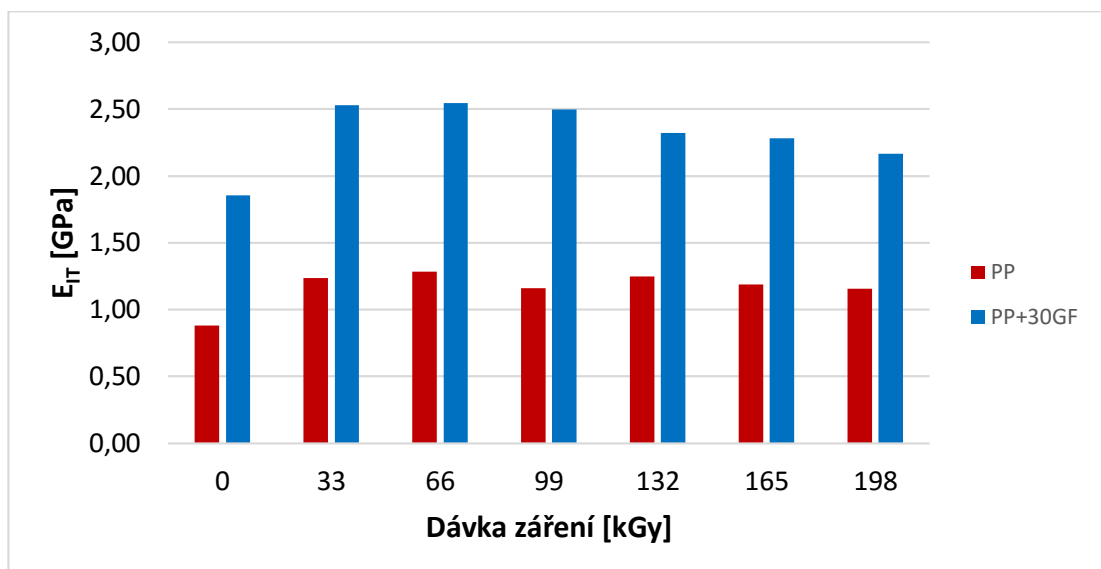
Tabulka 4 Naměřené hodnoty pro PP+30 GF

		0 kGy	33 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
H_{IT} [MPa]	\bar{x}	80,39	121,20	130,79	117,62	112,62	112,61	110,20
	s	4,99	5,30	10,02	6,95	7,87	5,25	7,06
E_{IT} [GPa]	\bar{x}	1,85	2,53	2,55	2,50	2,32	2,28	2,17
	s	0,07	0,35	0,28	0,27	0,28	0,28	0,25
C_{IT} [%]	\bar{x}	11,36	10,98	10,41	9,97	9,77	9,70	9,52
	s	0,78	0,74	0,50	0,44	0,76	0,34	0,58
H_{VIT} [Vickers]	\bar{x}	7,59	11,44	12,34	11,13	10,63	10,63	10,40
	s	0,47	0,50	0,95	0,66	0,74	0,50	0,67
W_{elast} [μJ]	\bar{x}	37,38	29,62	29,00	29,65	30,75	30,18	31,06
	s	0,95	0,63	0,59	0,66	0,70	0,62	0,69
W_{plast} [μJ]	\bar{x}	79,25	65,51	63,34	65,30	65,35	65,03	65,42
	s	2,15	1,58	2,14	2,37	3,01	1,78	2,69
W_{total} [μJ]	\bar{x}	116,63	95,13	92,34	94,95	96,10	95,21	96,47
	s	2,60	1,91	2,54	2,97	3,33	1,83	3,01
η_{IT} [%]	\bar{x}	32,06	31,14	31,41	31,24	32,02	31,71	32,21
	s	0,67	0,55	0,58	0,45	0,95	0,78	0,84



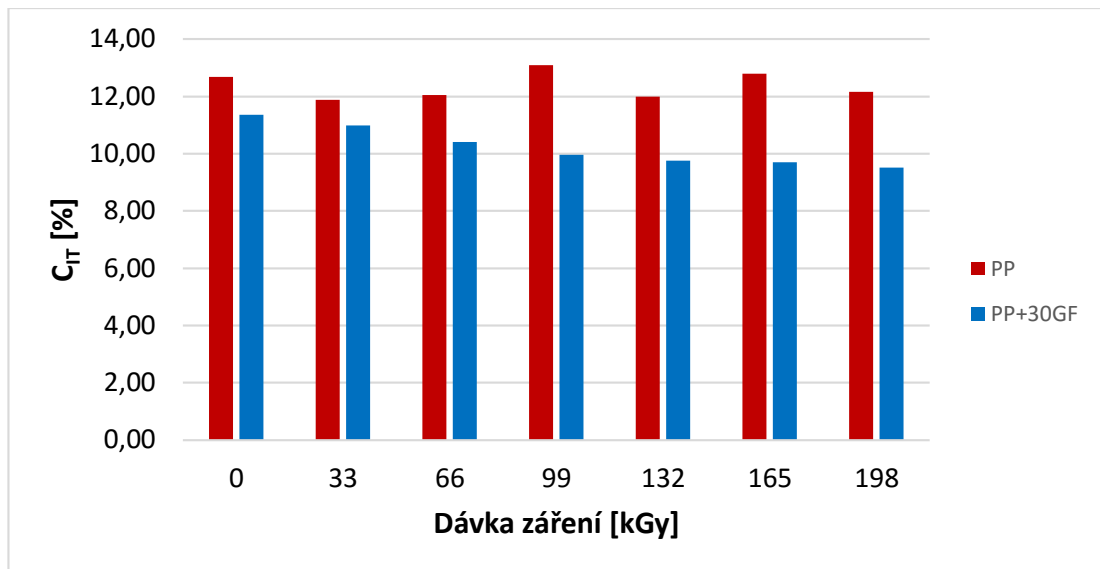
Obr. 21 Vtisková tvrdost

V celém rozsahu dávek záření, jsou hodnoty vtiskové tvrdosti větší u polypropylenu plněného skelnými vlákny. Nejvyšší naměřené hodnoty byly u obou materiálů zjištěny při záření 66 kGy. Nejmenší hodnoty vtiskové tvrdosti byly dosaženy při nulovém záření. U neplněného polypropylenu činí procentuální rozdíl mezi minimální a maximální dosaženou hodnotou vtiskové tvrdosti přibližně 50%. U polypropylenu plněného skelnými vlákny je procentuální nárůst mezi neozářeným vzorkem a vzorkem ozářeným dávkou 66 kGy, přibližně 63%.



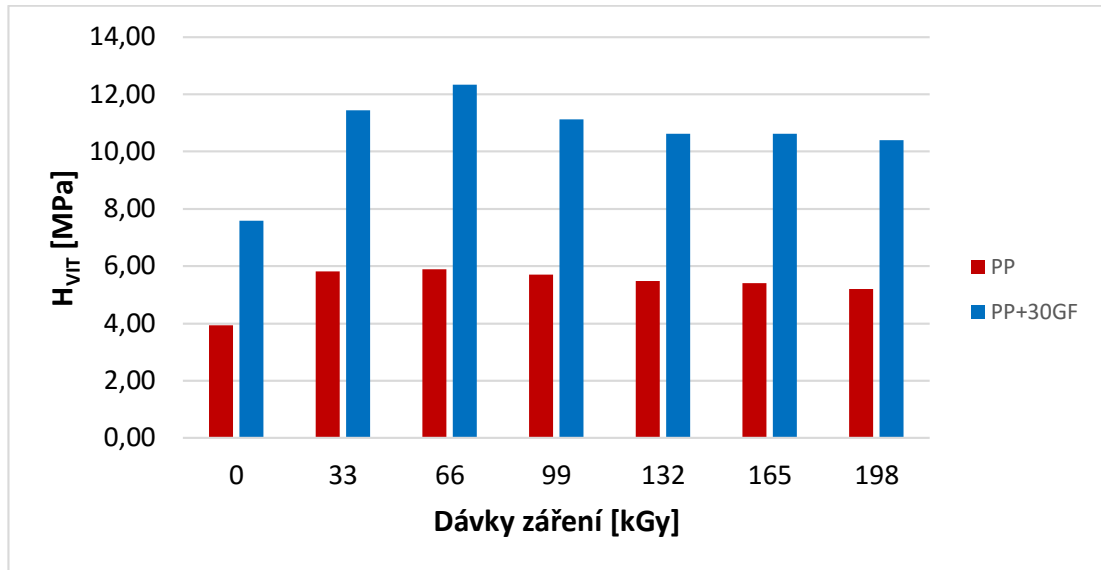
Obr. 22 Vtiskový modul

Hodnoty vtiskového modulu jsou, podobně jako u vtiskové tvrdosti, větší u polypropylenu plněného skelnými vlákny. Nejmenší hodnoty byly v obou případech dosaženy u neozářených vzorků. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny při ozáření dávkou 66 kGy. Procentuální rozdíl u neplněného polypropylenu mezi nemodifikovaným vzorkem a vzorkem ozářeným dávkou 66 kGy, je asi 45%. U plněného polypropylenu činí tento rozdíl přibližně 38%.



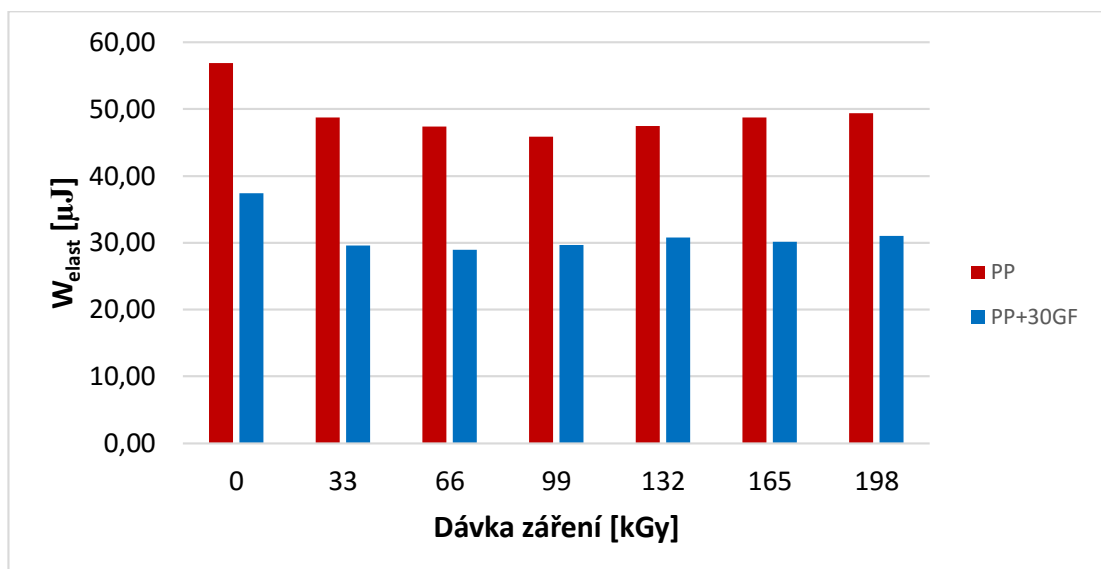
Obr. 23 Vtiskové tečení

Při ozáření dávkou 99 kGy, bylo dosaženo nejvyšší hodnoty vtiskového tečení u neplněného polypropylenu. Nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku modifikovaného zářením o dávce 33 kGy. U polypropylenu plněného skelnými vlákny byla nejvyšší hodnota vtiskového tečení zjištěna u neozářeného vzorku. Nejmenší hodnota byla naměřena při ozáření dávkou 198 kGy. U neplněného polypropylenu je procentuální nárůst mezi vzorkem modifikovaným dávkou 33 kGy a vzorkem ozářeným dávkou 99 kGy, přibližně 3%. U polypropylenu plněného skelnými vlákny činí procentuální pokles mezi neozářeným vzorkem a vzorkem modifikovaným dávkou 198 kGy, asi 19%.



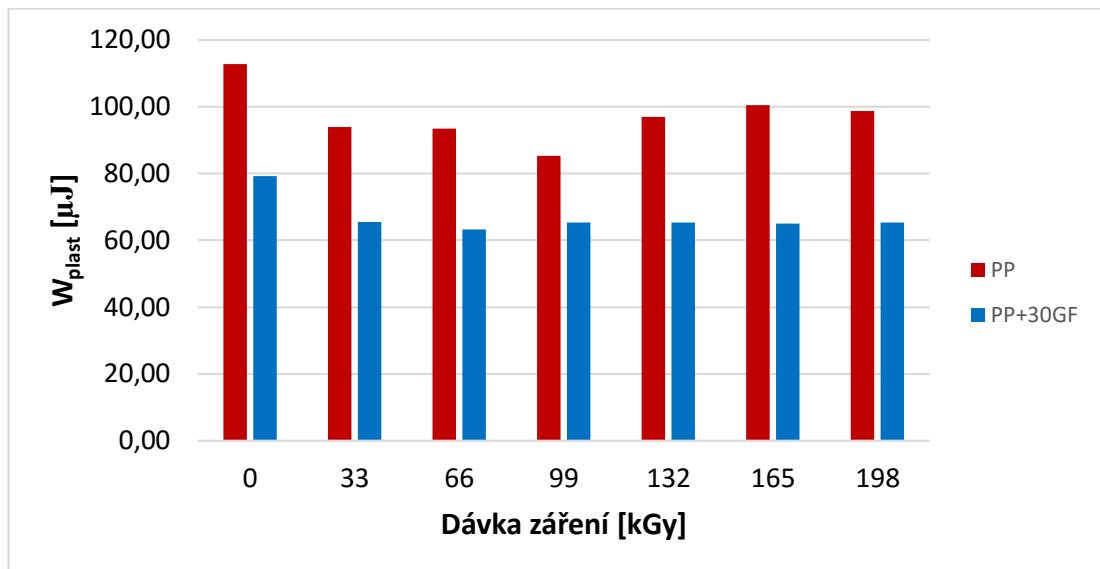
Obr. 24 Vickersova tvrdost

V celém rozsahu aplikovaných dávek záření beta, bylo dosaženo vyšších hodnot Vickersovi tvrdosti u polypropylenu plněného skelnými vlákny. Nejmenší hodnoty byly u obou materiálů naměřeny při nulovém záření. Největší hodnoty Vickersovi tvrdosti byly zjištěny při ozáření dávkou 66 kGy. Procentuální nárůst u neplněného propylenu mezi nemodifikovaným vzorkem a vzorkem ozářeným dávkou 66 kGy činí asi 50%. U plněného polypropylenu je procentuální nárůst mezi neozářeným vzorkem a vzorkem ozářeným dávkou 66 kGy, přibližně 63%.



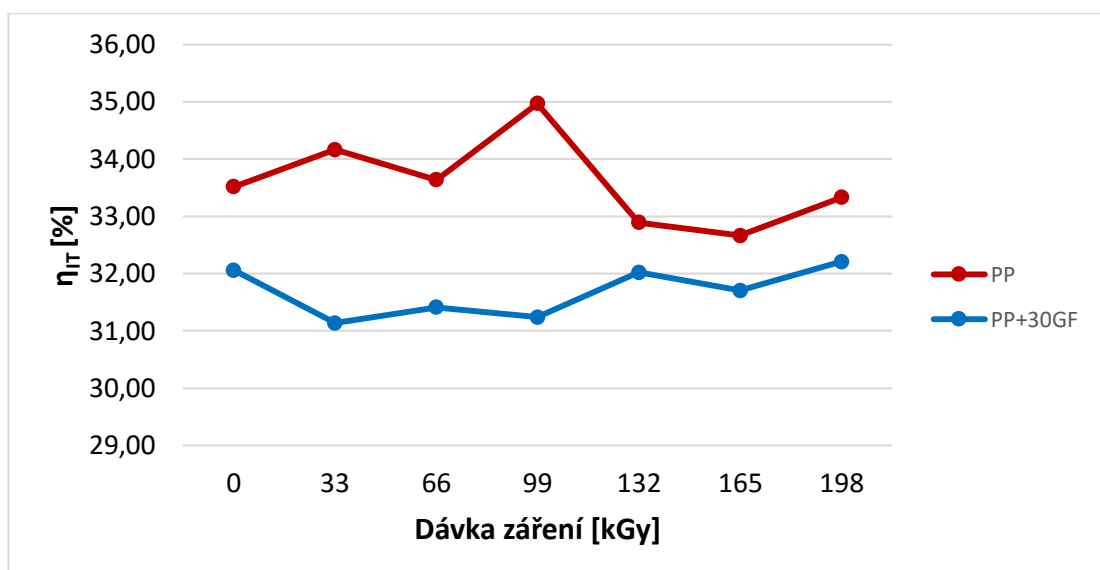
Obr. 25 Elastická deformační práce

Při ozáření vzorku dávkou 66 kGy, byla hodnota elastické deformační práce nejmenší u polypropylenu plněného skelnými vlákny. U neplněného polypropylenu byla nejnižší hodnota naměřena při ozáření dávkou 99 kGy. Největší hodnoty elastické deformační práce byly u obou materiálů zjištěny při nulovém záření.



Obr. 26 Plastická deformační práce

Nejvyšších hodnot plastické deformační práce u obou materiálů bylo dosaženo při nulovém záření. Nejmenší hodnoty plastické deformační práce byly naměřeny při ozáření vzorků dávkou 99 kGy. Neplněný polypropylen dosáhl v celém rozsahu záření beta, vyšších hodnot plastické deformační práce, oproti polypropylenu plněnému skelnými vlákny.



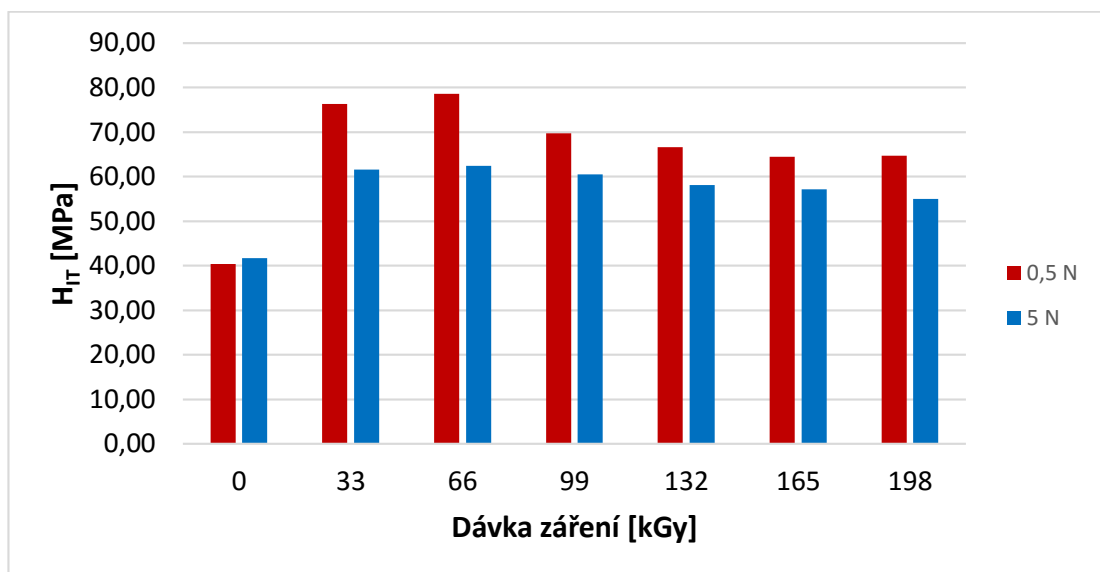
Obr. 27 Koeficient zpětné deformace

Neplněný polypropylen dosáhl v celém rozsahu aplikovaných dávek záření vyšších hodnot koeficientu zpětné deformace, než polypropylen plněný skelnými vlákny. Nejvyšší hodnota u neplněného polypropylenu byla naměřena při ozáření dávkou 99 kGy. Nejnížší dosažená hodnota koeficientu zpětné deformace byla zjištěna u vzorku modifikovaného dávkou záření 165 kGy. Polypropylen plněný skelnými vlákny dosáhl nejvyšší hodnoty koeficientu zpětné deformace při ozáření vzorku dávkou 198 kGy. Nejmenší naměřená hodnota byla zjištěna při záření 33 kGy.

8 DISKUSE VÝSLEDKŮ

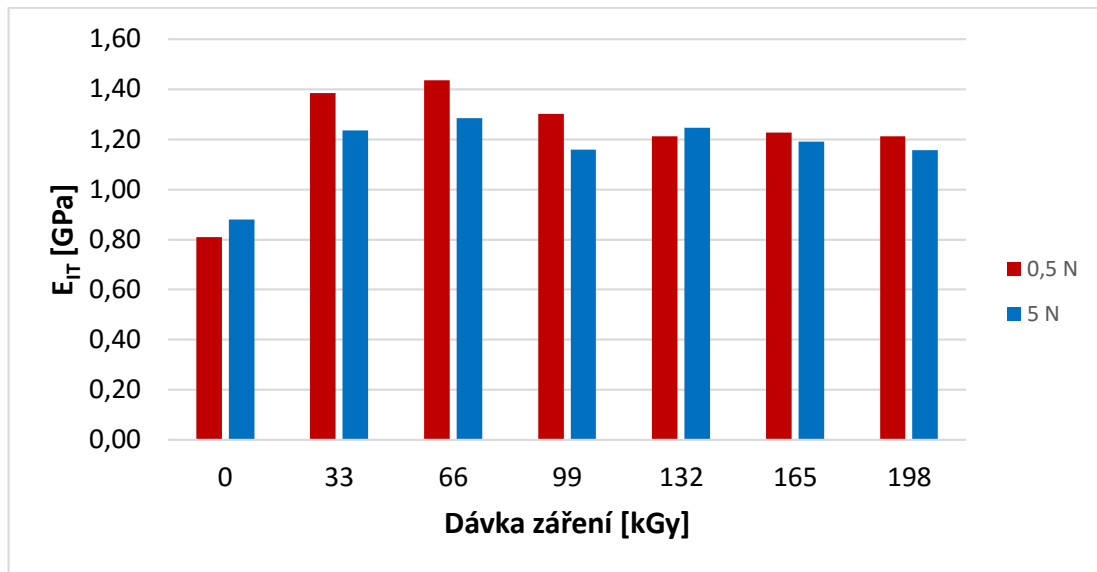
V praktické části bakalářské práce byly zkoumány mechanické vlastnosti vybraných polymerů. Konkrétně se jednalo o neplněný polypropylen a polypropylen plněný 30% skelných vláken. Vzorky byly modifikovány pomocí uvedených dávek záření beta a byly zkoumány změny jejich mechanických vlastností. Při měření byla využita Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI.

8.1 Polypropylen



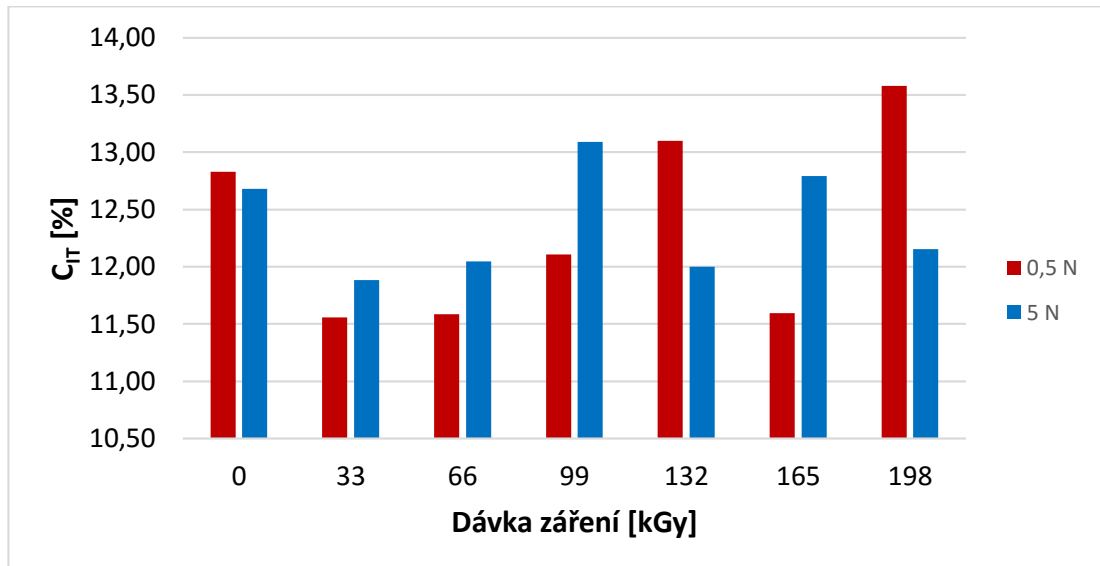
Obr. 28 Srovnání vtiskové tvrdosti

Při porovnání výsledků vtiskové tvrdosti bylo dosaženo v obou případech zatížení nejmenších hodnot u neozářených vzorků. Nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti byly zjištěny při modifikaci zářením o dávce 66 kGy.



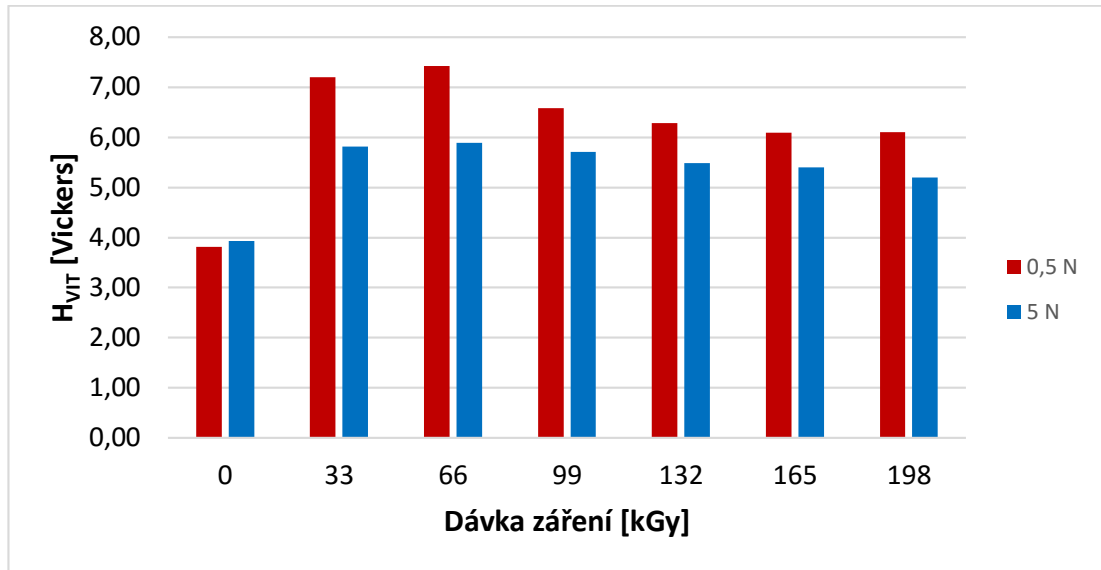
Obr. 29 Porovnání vtiskového modulu

Nejmenší hodnoty vtiskového modulu byly opět zjištěny u nemodifikovaných vzorků. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny při záření 66 kGy, což je stejný výsledek jako u vtiskové tvrdosti. Z grafického vyhodnocení výsledků je také zřejmé, že hodnoty vtiskového modulu se v obou případech zatížení výrazněji neliší.



Obr. 30 Srovnání vtiskového tečení

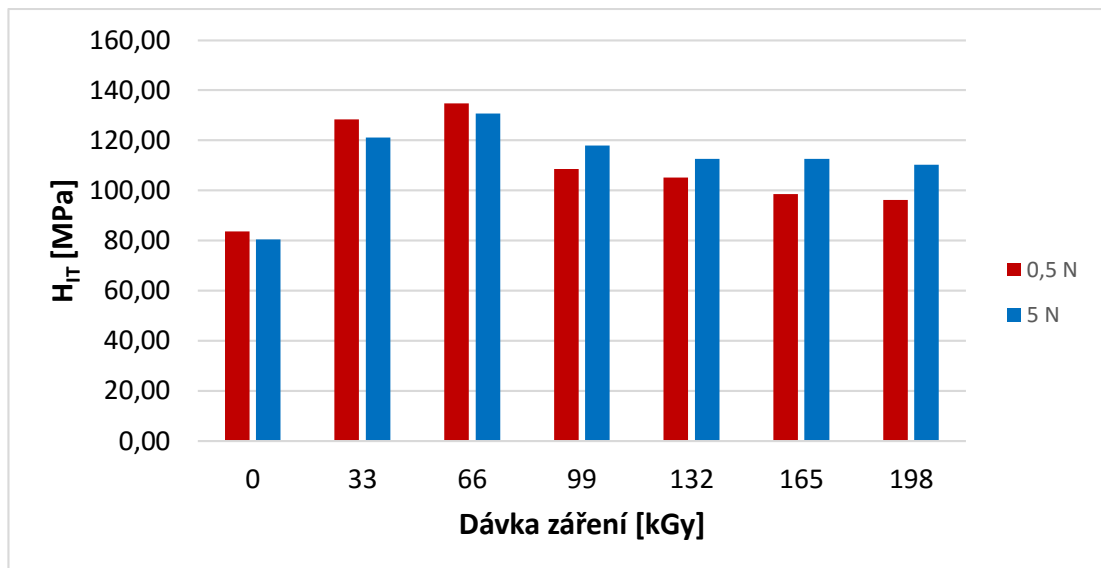
V obou případech zatížení byly nejmenší hodnoty vtiskového tečení naměřeny u vzorků, které byly ozářeny dávkou 33 kGy. Při zatížení 0,5 N byla nejvyšší hodnota zjištěna při ozáření dávkou 198 kGy. Při zatížení 5 N byla nejvyšší hodnota vtiskového tečení naměřena při aplikaci záření 99 kGy.



Obr. 31 Srovnání Vickersovi tvrdosti

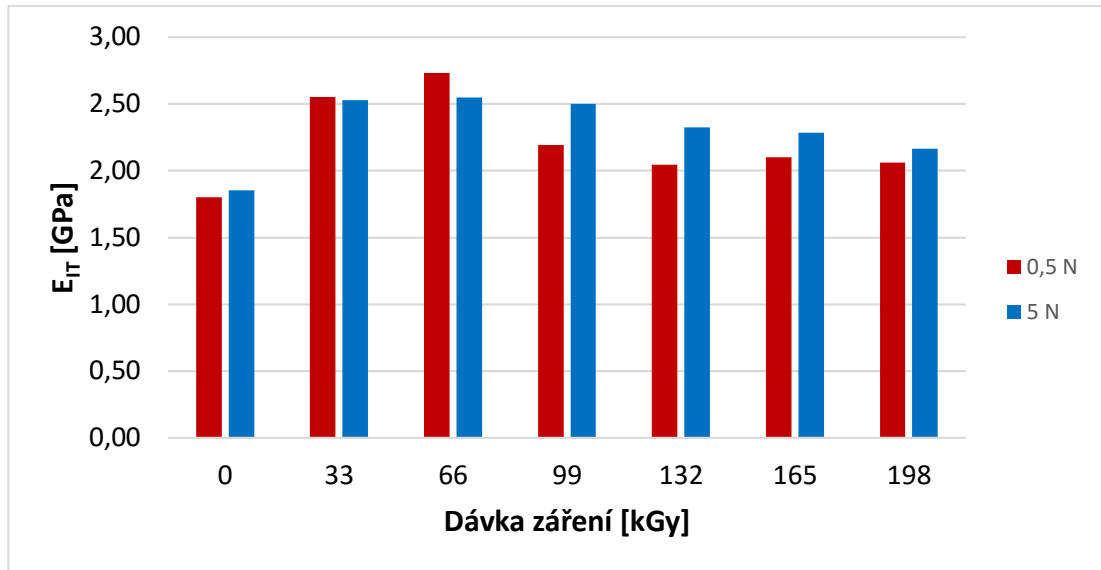
Při porovnání Vickersovi tvrdosti bylo dosaženo nejmenších hodnot při nulovém záření. Při záření o dávce 66 kGy byly hodnoty v obou případech zatížení největší. Jedná se o stejné výsledky, jakých bylo dosaženo při porovnání vtiskové tvrdosti a vtiskového modulu.

8.2 Polypropylen plněný skelnými vlákny



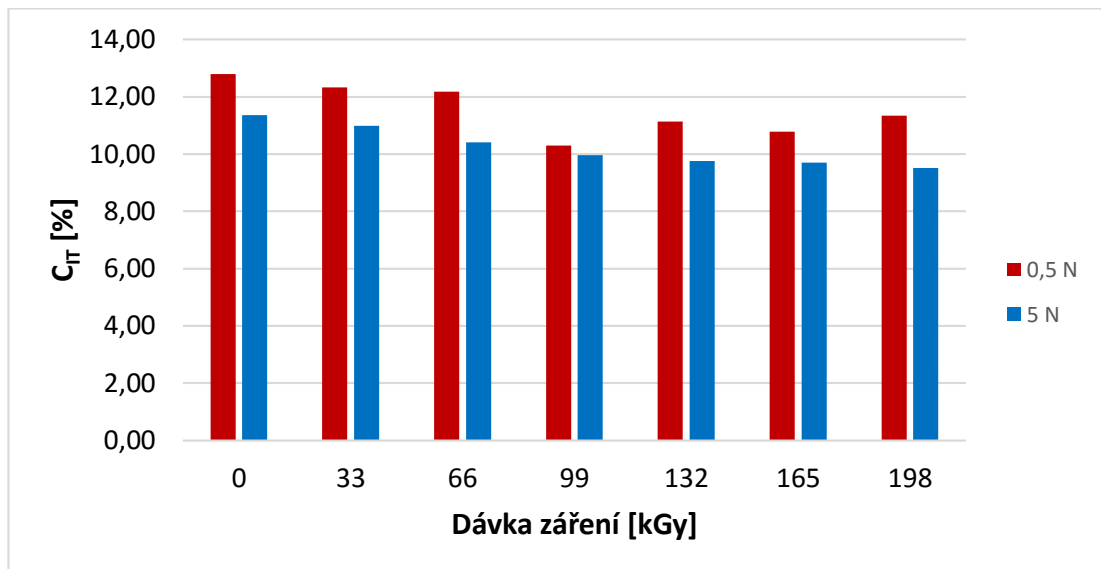
Obr. 32 Porovnání vtiskové tvrdosti

Shodně jako v předchozích případech, byly hodnoty vtiskové tvrdosti nejmenší u neozářených vzorků. Nejvyšší hodnoty byly v obou případech zatížení naměřeny při aplikované dávce záření o velikosti 66 kGy.



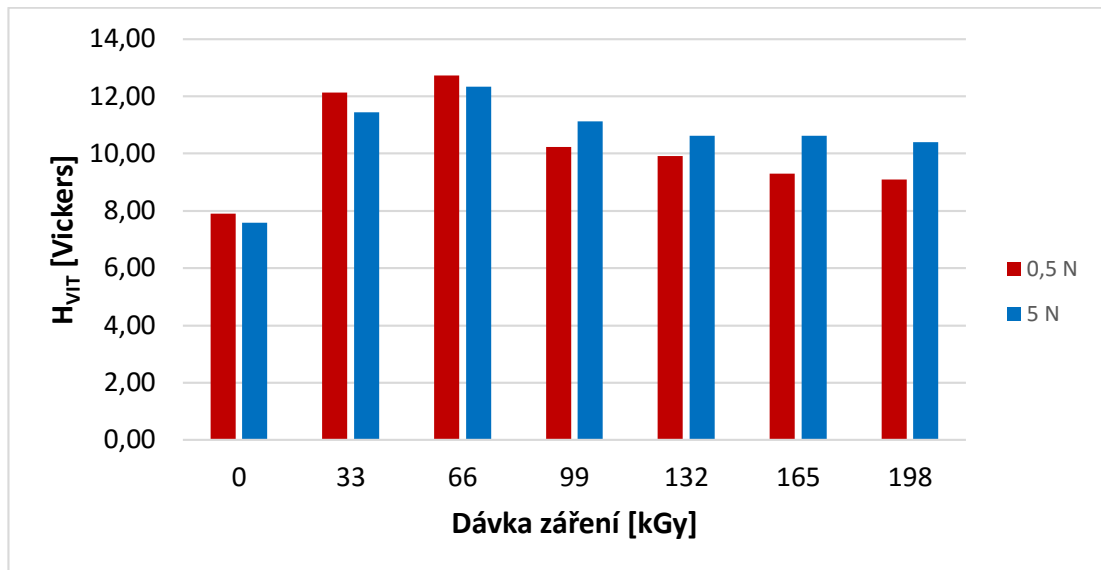
Obr. 33 Srovnání vtiskového modulu

U neozářených vzorků byly zjištěné hodnoty vtiskového modulu nejmenší. Naopak nejvyšších hodnot bylo dosaženo při modifikaci zářením o dávce 66 kGy. Jedná se tedy o stejné hodnoty, jaké byly naměřeny u neplněného polypropylenu.



Obr. 34 Porovnání vtiskového tečení

Z grafického vyhodnocení vtiskového tečení, byly nejvyšší hodnoty naměřeny u nemodifikovaných vzorků. V obou případech zatížení byly nejmenší hodnoty zjištěny při ozáření dávkou 99 kGy.



Obr. 35 Srovnání Vickersovi tvrdosti

Při porovnání výsledků Vickersovi tvrdosti bylo dosaženo, stejně jako v předchozích případech, nejmenších hodnot u neozářených vzorků. Nejvyšší dosažené hodnoty byly naměřeny při aplikovaném záření o dávce 66 kGy.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo měření mechanických vlastností neplněného polypropylenu a polypropylenu plněného 30% skelných vláken. Uvedené polymerní materiály byly modifikovány pomocí záření beta a byly zkoumány jejich změny mechanických vlastností, v závislosti na aplikované dávce záření.

Měření mechanických vlastností bylo provedeno pomocí Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI, na zařízení Mico Combi Tester. Během měření byly využity zatížení o velikosti 0,5 a 5 N. Získané hodnoty byly poté statisticky zpracovány a graficky vyhodnoceny.

Při vyhodnocení vtiskové tvrdosti, bylo dosaženo u obou materiálů nejvyšších hodnot při ozáření vzorků dávkou 66 kGy. Nejmenší hodnoty byly naměřeny u neozářených vzorků. V celém rozsahu aplikovaných dávek záření, byly hodnoty vtiskové tvrdosti vyšší u polypropylenu plněného skelnými vlákny.

Hodnoty vtiskového modulu dosahují u obou materiálů nejvyšších hodnot při aplikaci záření o dávce 66 kGy. Shodně s vtiskovou tvrdostí byly zjištěny nejmenší hodnoty vtiskového modulu u nemodifikovaných vzorků.

Při porovnání hodnot vtiskového tečení u polypropylenu plněného skelnými vlákny, bylo dosaženo velmi podobných výsledků. Naopak u neplněného polypropylenu byly rozdíly mezi hodnotami vtiskového tečení výraznější.

Hodnoty Vickersovi tvrdosti byly u obou zkoumaných materiálů nejvyšší při záření 66 kGy. Nejmenší naměřené hodnoty byly zjištěny u neozářených vzorků. Podobně jako u vtiskové tvrdosti a vtiskového modulu, bylo dosaženo vyšších hodnot Vickersovi tvrdosti u polypropylenu plněného skelnými vlákny.

Při vyhodnocení výsledků elastické a plastické deformační práce, bylo dosaženo vyšších hodnot u neplněného polypropylenu, než u polypropylenu plněného skelnými vlákny. Bylo také zjištěno, že v obou případech zatížení převládá práce plastická oproti práci elastické.

U koeficientu zpětné deformace, byly naměřené hodnoty větší u neplněného polypropylenu a to v celém rozsahu aplikovaných dávek záření beta.

Získané poznatky a výsledky měření tedy ukazují, že modifikace vybraných polymerů pomocí záření beta, zlepšuje jejich mechanické vlastnosti. Je ale nutno dodat, že při samotném ozařování vzorků se musí aplikovat optimální dávka záření, která nám zaručí zlepšení mechanických vlastností polymerního materiálu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vydání. Praha: Vysoká škola chemická, 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6
- [2] Polymery „stručně“ [online]. [cit. 2015-10-11]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/4894705-V-svorcik-polymery-polymery-strucne.html>
- [3] MACEK, Karel a Petr Zuna. Nauka o materiálu 1. vyd. Praha: ČVUT, 1999, 209 s. ISBN 80-01-01507-6
- [4] Technologie II., [online]. [cit. 2015-10-18]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm#012
- [5] Makromolekulární látky, [online]. [cit. 2015-10-18]. Dostupné z: http://ucitelchemie.upol.cz/materialy/studijni_texty/vyukova_temata/plasty_text.pdf
- [6] Plasty, [online]. [cit. 2015-10-18]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf>
- [7] Měření tvrdosti, [online]. [cit. 2015-10-30]. Dostupné z: <http://www.merenitvrlosti.cz/>
- [8] Zkouška tvrdosti dle Brinella, [online]. [cit. 2015-10-8]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrдост-brinell.htm>
- [9] Zkoušky tvrdosti, [online]. [cit. 2015-11-8]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [10] Zkouška tvrdosti podle Brinella, [online]. [cit. 2015-11-8]. Dostupné z: <http://www.zadania-seminarky.sk/meranie/zkouska-tvrlosti-podle-brinella/14977>
- [11] SKÁLOVÁ, J. KOVAŘÍK, R. a BENEDIKT, V. Základní zkoušky kovových materiálů. Západočeská univerzita v Plzni 2005, 178 s. ISBN 80-7043-417-1
- [12] Kontrola a měření, [online]. [cit. 2015-11-8]. Dostupné z: http://www.spskarvina.cz/projekty/Ict2005/manual/data/odborne/mereni/Strojni_a_technologicka_mereni.pdf
- [13] Zkoušky tvrdosti, [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/KOM/KOM_3_11_SPU-mereni_tvrlosti_2.pdf

- [14] DUŠEK, Jiří. Dizertační práce - Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost – čisté kovy měřené metodou DSI. Brno, Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta 2008. 171s.
- [15] ČSN EN ISO 14577. Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [16] Zkoušky tvrdosti, [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z:
<http://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1105>
- [17] Radioaktivita a ionizující záření, [online]. [cit. 2015-12-11]. Dostupné z:
<http://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/050/.content/sys-cs/resource/PDF/studijni-materialy/zareni.pdf>
- [18] Charakteristika ionizujícího záření, [online]. [cit. 2015-12-11]. Dostupné z:
<http://fbmi.sirdik.org/>
- [19] DANĚK, M. Dizertační práce – Vliv záření na vlastnosti polymerů. Zlín, UTB, 2013. 118 s.
- [20] ADÁMEK, R. Diplomová práce – Vliv záření na vlastnosti vybraných plastů. Zlín, UTB, 2013. 183 s.
- [21] SVOBODA E. a kol. Přehled středoškolské fyziky. Praha: nakladatelství Prometheus, spol. s.r.o., 2001, 484 s. ISBN 80-7196-116-7.
- [22] Wikipedie: Otevřená encyklopedie, [online]. [cit. 2015-12-11]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/>
- [23] Polypropylen, [online]. [cit. 2016-3-23]. Dostupné z:
<http://petroleum.cz/vyrobky/polypropylen.aspx>
- [24] Termoplasty – polypropylen PP, [online]. [cit. 2015-3-23]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf
- [25] Polymery, [online]. [cit. 2015-3-23]. Dostupné z:
<http://publi.cz/books/180/18.html>
- [26] NAVRÁTILOVÁ, V. Diplomová práce – Vliv zpracovatelských parametrů na vlastnosti PP plněného dlouhým skleněným vláknem. Zlín, UTB, 2013. 96 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

T_m	Teplota tání
RTG	Rentgenové záření
HB	Tvrдость podle Brinella
HRC	Tvrдость podle Rockwella
HV	Tvrдость podle Vickerse
H_{IT}	Vtisková tvrдость
F	Zatěžující síla
S	Plocha vtisku
D	Průměr kuličky
t	Doba zatížení
$d_{1,2}$	Změřená úhlopříčka vtisku
d	Průměrná hodnota vtisku
h	Hloubka vtisku
F_{max}	Maximální zatěžující síla
A_p	Kontaktní plocha vnikacího tělesa
E	Youngův modul
E_{IT}	Vtiskový modul
E_r	Redukovaný modul
E_i	Modul vnikacího tělesa
ν_s	Poissonův poměr zkušebního tělesa
ν_i	Poissonův poměr vnikacího tělesa
C_{IT}	Vtiskové tečení
W_{elast}	Elastická deformační práce
W_{plast}	Plastická deformační práce

W_{total}	Celková deformační práce
η_{IT}	Koeficient zpětné relaxace
ISE	Vliv velikosti vtisku (Indentation Size Effect)
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti (Depth Sensing Indentation)
PP	Polypropylen
GF	Skelná vlákna (Glass Fiber)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Dělení polymerů [1].....	12
Obr. 2 Záření beta [22]	16
Obr. 3 Záření gama [22]	17
Obr. 4 Princip vrypové zkoušky	19
Obr. 5 Shoreho zkouška [7]	19
Obr. 6 Brinellova zkouška [10].....	21
Obr. 7 Rockwellova zkouška tvrdosti [8]	21
Obr. 8 Vickersova zkouška [16]	22
Obr. 9 Schématické znázornění příčného řezu vtisku [15]	24
Obr. 10 Indentační křivka [15]	25
Obr. 11 Nakupení a vtažení materiálu [14].....	28
Obr. 12 Micro Combi Tester.....	31
Obr. 13 Strukturní vzorec PP [22]	32
Obr. 14 Vtisková tvrdost.....	36
Obr. 15 Vtiskový modul	36
Obr. 16 Vtiskové tečení	37
Obr. 17 Vickersova tvrdost.....	38
Obr. 18 Elastická deformační práce.....	38
Obr. 19 Plastická deformační práce	39
Obr. 20 Koeficient zpětné deformace	40
Obr. 21 Vtisková tvrdost.....	42
Obr. 22 Vtiskový modul	42
Obr. 23 Vtiskové tečení	43
Obr. 24 Vickersova tvrdost.....	44
Obr. 25 Elastická deformační práce.....	44
Obr. 26 Plastická deformační práce	45
Obr. 27 Koeficient zpětné deformace	45
Obr. 28 Srovnání vtiskové tvrdosti	47
Obr. 29 Porovnání vtiskového modulu	48
Obr. 30 Srovnání vtiskového tečení.....	48
Obr. 31 Srovnání Vickersovi tvrdosti	49
Obr. 32 Porovnání vtiskové tvrdosti	49

Obr. 33 Srovnání vtiskového modulu	50
Obr. 34 Porovnání vtiskového tečení.....	50
Obr. 35 Srovnání Vickersovi tvrdosti	51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Naměřené hodnoty pro PP	35
Tabulka 2 Naměřené hodnoty pro PP+30 GF	35
Tabulka 3 Naměřené hodnoty pro PP	41
Tabulka 4 Naměřené hodnoty pro PP+30 GF	41

SEZNAM PŘÍLOH

PI CD ROM

PŘÍLOHA P I: CD ROM