

Měření mikro-mechanických vlastností polymerů

Martin Chytil

Bakalářská práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Chytil**

Osobní číslo: **T15735**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření mikro-mechanických vlastností 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:

2. ledna 2017

Termín odevzdání bakalářské práce:

19. května 2017

Ve Zlíně dne 30. ledna 2017



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



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

Příjmení a jméno:

MARTIN CHYTIL

Obor:

TZ

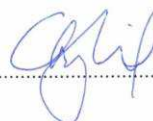
PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

8.5.2017



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

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

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

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

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

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě 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).

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

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

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá charakteristikou mikro-mechanického chování polymerů. Pro měření a zkoumání vlastností vtiskové tvrdosti, vtiskového modulu, vtiskového tečení a deformační práce. Byly studovány vlastnosti polymerů. Změny ve vlastnostech byly studovány v závislosti na množství aplikované dávky ozáření.

Klíčová slova: zkouška tvrdosti, mikrotvrdost, modifikace polymerů

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with the characterization of micro-mechanical behavior of polymers. For measuring the characteristics of indentation hardness, indentation module, indentation creep and deformation work. There were studied characteristics of polymers. Changes in characteristics were studied depending on the amount of applied irradiation dose.

Keywords: Depth Sensing Indentation, microhardness, modification of polymers.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLYMERY	11
1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ DLE CHOVÁNÍ ZA TEPLA	11
1.1.1 Termoplasty.....	12
1.1.2 Reaktoplasty.....	12
1.1.3 Elastomery.....	13
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ DLE VÝCHOZÍ SUROVINY	13
1.2.1 Přírodní polymery	13
1.2.2 Syntetické polymery.....	14
1.3 STRUKTURA POLYMERŮ A JEJÍ VLIV NA VLASTNOSTI.....	14
2 TVRDOST MATERIÁLU	16
2.1 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	16
2.1.1 Tvrdost podle Rockwella	17
2.1.2 Tvrdost podle Brinella.....	20
2.1.3 Tvrdost podle Vickerse	23
3 MIKROTVRDOST	27
3.1 ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI	27
3.1.1 Mikrotvrdomost podle Knoopu	27
3.1.2 Zkouška mikrotvrdomosti dle Vickerse	29
3.1.3 Zkouška mikrotvrdomosti dle Berkoviče	31
4 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI	32
5 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI	33
5.1 INDENTAČNÍ KŘIVKY	34
5.2 STANOVENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY.....	35
5.2.1 Vtiskový modul pružnosti	35
5.2.2 Vtiskové tečení.....	35
5.2.3 Tvrdost	36
5.2.4 Plastická a elastická práce vtisku	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	38
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
7.1 POLYBUTYLENE TEREPHTHALATE (PBT).....	39
7.1.1 Vlastnosti PBT	39
7.1.2 Aplikace PBT	40
7.2 PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	40
7.3 SÍŤOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	41
7.4 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI	41
7.5 POSTUP MĚŘENÍ.....	42
8 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	43

8.1	POUŽITÉ VELIČINY	43
8.2	ZKUŠEBNÍ ZATÍŽENÍ 0,5 N	44
8.3	ZKUŠEBNÍ ZATÍŽENÍ 5 N	49
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ	54
9.1	POLYBUTYLEN-TEREFTALÁT NEPLNĚNÝ	54
9.2	POLYBUTYLEN-TEREFTALÁT PLNĚNÝ 30% SKELNÝCH VLÁKEN	56
	ZÁVĚR	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ	64
	SEZNAM TABULEK	66
	SEZNAM PŘÍLOH	67

ÚVOD

Tvrдость označujeme za významnou mechanickou vlastnost materiálu. Zkoušky mají své pozitiva zejména v podobě jednoduchosti a opakovatelnosti zkoušek. K dalším výhodám můžeme řadit měření přímo na daném výrobku a jeho polotovarech.

Rozmach měření tvrdosti nastal s první polovinou 20. století, kdy vznikly metody zkoušky podle Brinella, Rockwella, nebo Vickerse. S Rostoucím tlakem na materiály a na miniaturizaci přístrojů byl vysoce ovlivněn přístup k měření tvrdosti. Neúnavné zmenšování a snaha o ekonomickou výhodnost pro trh klasicky vyráběných produktů, klade vyšší požadavek na kvalitu materiálů, ale i na rozměry daných součástí. Dřívější standartní metody tvrdosti nebyly schopny ukázat objektivní výsledky například při měření tenkých vrstev materiálu. Tato fáze však dala za vznik metodám měření mikrotvrdosti a nanotvrdosti.

Mezi nejnovější metody zkoumání mikrotvrdosti řadíme metodu DSI neboli Instrumentovaná zkouška tvrdosti. Ta díky možnosti propojení přístroje s počítačem dává možnost zkoumání vlastností materiálu a následnému vyhodnocení hodnot s pomocí programů a softwaru.

Cílem bakalářské práce bylo měření mikro-mechanických vlastností polymerů. Polymery zahrnují nesčetnou škálu využití a vzhledem k jejich modifikovatelným vlastnostem se nachází ve všech průmyslových oblastech a odvětvích.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Při pohledu do historie označujeme velké epochy rozvoje lidstva dle nejtypičtějšího materiálu, jenž byl člověku nápomocen. Zpravidla tedy mluvíme o době kamenné, bronzové, železné – dobu, kterou tedy žijeme právě teď můžeme tedy označit po právu jako dobu polymerní. [1]

Polymery můžeme nazývat přírodní nebo také syntetické látky, v jejichž makromolekule se jako článek v řetězu mnohonásobně opakuje základní monomerní jednotka. Jsou tedy takovou chemickou stavebnicí, jenž umožňuje neobyčejnou proměnlivost vlastností i struktur výsledných látek.

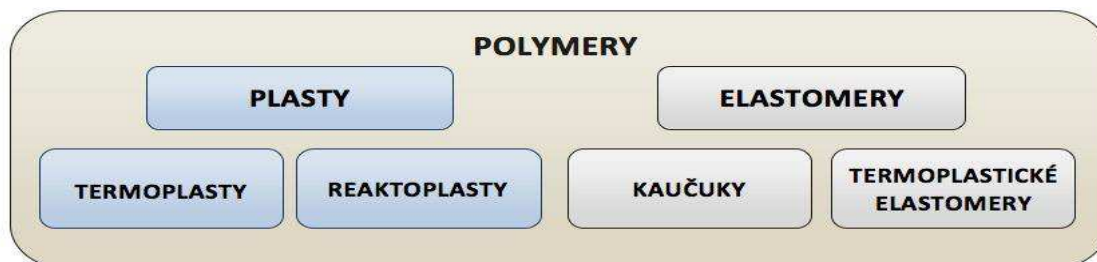
Objevení syntetických polymerů v první polovině 20. století se zasloužilo o rozmach plastikářství, gumárenství, výrobu syntetických vláken, folií a kompozitních materiálů, jenž velkou měrou ovlivnily vývoj od letectví až po sportovní vybavení. Tyto materiály a oblasti průmyslu spojujeme se světovým hospodářstvím konce 20. století. Pokud by náhodou polymery opustily světlo světa, mělo by to za následek zhroucení celé současné technické civilizace.[2]

S dnešním trendem doby – kladením větších nároků na výrobky z polymerů se vyloučilo užití samotných, čistých polymerů, ale jen upravených dalšími přísadami, jenž spolu s polymery tvoří polymerní směsi.

K nejdůležitějším přísadám řadíme stabilizátory, plastikační činidla, změkčovadla, síťovací činidla, separační činidla a maziva. Každá z přísad má vliv jak na vlastnosti polymerní směsi, tak na výsledný produkt po zpracování [1]

1.1 Rozdělení polymerů dle chování za tepla

Základní skupiny dělení polymerů označujeme jako plasty a elastomery. Dále dělíme plasty na termoplasty a reaktoplasty, elastomery na kaučuky a termoplastické elastomery.



Obr. 1 Rozdělení polymerů

1.1.1 Termoplasty

Termoplasty jsou takové materiály, které zahřátím přechází do plastického stavu a jsou tvářitelné. Zahřátím nad teplotu tání poté přecházejí do oblasti taveniny. Opětný přechod do tuhého stavu lze vyvolat zpětným ochlazením pod tuto teplotu. Proces měknutí a tuhnutí je vratný jelikož zahříváním nedochází k chemické reakci a tudíž změny procházející materiálem jsou jen fyzikálního charakteru. Představitelé termoplastů : PS (polystyren), PMMA (polymethyl-methakrylát), PP (polypropylen), PVC (polyvinylchlorid).



Obr. 2 Příklad využití termoplastů

1.1.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty rozumíme materiály jejichž tavitelnost a tvarovatelnost je omezena jen na určitou dobu po zahřátí. Poté pomocí katalyzátorů nebo dalšího zahřátí dochází k zesíťování a stávají se nerozpustnými a netavitelnými. Chemickou reakci, která stojí za vznikem zesíťované struktury označujeme jako vytvrzování. Výrobky z reaktoplastů jsou známé svou tuhostí, tvrdostí a chemickou odolností.



Obr. 3 Příklad využití reaktoplastů

1.1.3 Elastomery

Jsou elastické materiály s vysokou tuhostí které lze využitím malé síly značně deformovat, aniž by jsme porušili jeho strukturu. Deformace zpravidla vratná. Hlavním představitelem elastomerů jsou kaučuky, z nichž vyrábíme vulkanizací pryže. [3]



Obr. 4 Mechanické namáhání plastu a elastomeru.

1.2 Rozdělení polymerů dle výchozí suroviny

Polymery dělíme na přírodní a syntetické. Polymery syntetické vznikají chemickou cestou (syntézou), podle které taky dostaly svůj název. [1]

1.2.1 Přírodní polymery

Přírodní polymery byly prvními makromolekulárními látkami, které našly pro naši civilizaci technické využití.

Významné přírodní polymery jsou:

- Přírodní kaučuk – bývá složkou některých rostlin v podobě mlékovité šťávy, nazývané latex. K těžbě využíváme stromu Kaučukovníku brazilského, jenž je pěstován na plantážích.
- Polysacharidy – jsou přírodními polymery, jejichž makromolekuly jsou složeny z jednoduchých cukrů. K hlavním zástupcům polysacharidů řadíme hroznový cukr, celulózu a škrob.
- Bílkoviny – také zvané jako proteiny, jsou složkou všech žijících buněk. Bez nich by neexistovaly žádné živé organismy. Dělíme na globulární a vláknité. [1]

1.2.2 Syntetické polymery

Výroba reakcemi z jednoduchých organických sloučenin, při nichž dochází ke spojení velkého množství výchozích molekul v makromolekulu. Příklad : bakelit, polyethylen, polystyren.

Syntetické polymery rozdělujeme dle typu chemických reakcí dle nichž vznikají na:

- polymery připravené polymerací
- polymery připravené polykondenzací
- polymery připravené polyadicí [4]

1.3 Struktura polymerů a její vliv na vlastnosti

Velký vliv na vlastnosti polymerů má jeho molekulová struktura (tvar a délka makromolekul i velikost sil, které mezi nimi působí). Makromolekuly mohou být rozvětvené, síťované nebo lineární.

- **Lineární** – k tvorbě makromolekul dochází spojením monomerních jednotek se dvěma funkčními skupinami. Funkční skupiny mohou snadno vznikat rozštěpením jedné ze dvou vazeb, které tvoří dvojnou vazbu v monomeru.



Obr. 5 Molekulární struktura polymeru

- **Rozvětvené** – Základní řetězce makromolekul jsou vázány krátkými bočními substituenty, jež zhoršují jejich pohyblivost. Díky rozvětvení makromolekul dochází k jejich vzájemnému oddálení, jež má za následek pokles sil mezi makromolekulami a tím se zhoršuje mechanická pevnost, tvrdost, modul pružnosti a jiné vlastnosti polymeru.
- **Sít'ované** – makromolekuly pochází z lineárních makromolekul spojením sousedících řetězců příčnými chemickými vazbami na různých místech. Zesítnění má za následek omezení pohyblivosti makromolekul jako celku. Tyto polymery poté ztrácí tavitelnost, rozpustnost, zhoršení houževnatosti a naopak dojde ke zvýšení teplotní odolnosti, tvrdosti a modulu pružnosti. Hustota zasítnění poté ovlivňuje výsledné vlastnosti polymeru. [3]

LINEÁRNÍ	ROZVĚTVENÉ	SESÍŤOVANÉ
<ul style="list-style-type: none"> ▪ vyšší hustota materiálu ▪ vyšší pevnost ▪ vyšší modul pružnosti ▪ nižší tažnost ▪ vyšší teplotní odolnost ▪ dobrá tekutost taveniny ▪ snadná krystalizace 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nižší hustota materiálu ▪ nižší pevnost ▪ nižší modul pružnosti ▪ vyšší tažnost ▪ nižší teplotní odolnost ▪ nižší tekutost taveniny ▪ nižší schopnost krystalizace 	<p><i>Vlastnosti závisí na hustotě sítě. S vyšší hustotou sítě se materiál vyznačuje zpravidla:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ vysokou pevností ▪ vysokým modulem pružnosti ▪ vysokou teplotní odolnosti ▪ velmi nízkou tažností

Obr. 6 Závislost vlastnosti polymerů na tvaru molekul [3]

2 TVRDOST MATERIÁLU

Tvrдость nejčastěji definujeme jako odpor proti deformaci povrchu materiálu vyvolaný působením cizího tělesa. K měření tvrdosti využíváme několik metod, jež využívají různou geometrii zkušebních tělísek, nelze s přesností určit tvrdost daného zkoušeného vzorku. Výsledná měření se budou lišit dle zvolené měřicí metody. [6]

Zkoušky tvrdosti jsou v praxi hojně využívány pro svoji rychlost provedení a jednoduchost. Vhodné také díky univerzálnosti použití pro zkoušení jak malých vzorků, tak kusů velkých rozměrů, zkoušky neporušují zkoušený materiál, dochází jen k ovlivnění malého objemu na povrchu. Dle výsledné tvrdosti poté často odhadujeme ostatní mechanické vlastnosti. [5]

Tvrдость materiálu nám také ovlivňují následující faktory:

- Plastické a elastické vlastnosti materiálu (mez kluzu, modul pružnosti ve smyku a tahu)
- mikrostruktura materiálu
- velikost síly působící na vnikající těleso
- rozměry, tvar vnikajícího tělesa a jeho rychlost vnikání
- tloušťka daného vzorku
- doba působícího zatížení
- zpevnění vyvolané tvářením za studena
- teplota při které probíhá zkouška [7]

2.1 Zkoušky tvrdosti

V praxi řadíme mezi nejpoužívanější obor zkoušení materiálu. Zkoušky provádíme většinou na zkušebních tělesech daných součástí. Zkušební tělesa jsou zpravidla zhotoveny z materiálů součástí, nebo také ze samotných součástí. Provedení zkoušek, vždy na povrchu zkoušeného tělesa. [8]

V současnosti máme mnoho zkoušek tvrdosti, které můžeme rozdělit:

Dle použitého principu:

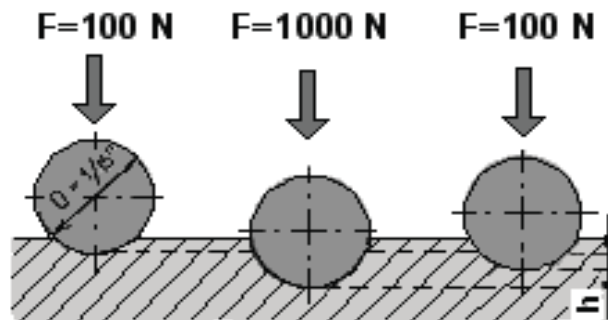
- Vrypové (Martens)
- Odrazové (Shore)
- Vnikající (Rockwell, Brinell, Vickers)

Dle rychlosti působení zatěžující síly:

- Statické (Brinell, Knoop, Vickers, Rockwell,).
- Dynamické (Poldiho kladívko, Baumanovo kladívko, Shoreho skleroskop, duro-
skop) [5]

2.1.1 Tvrdost podle Rockwella

Tato metoda byla poprvé použita roku 1922 S. P. Rockwellem ve Spojených státech amerických. V technické praxi řadíme tuto metodu mezi nejrozšířenější, zejména díky jednoduchosti. Při této metodě si míru tvrdosti neurčujeme výpočtem nebo vyhledáváním a porovnáváním v tabulkách, ale pouze odečtením na tvrdoměru, protože je zde vyjadřována hloubka trvalého vtisku. Oblíbenost této metody tkví také ve všestrannosti využití, jelikož s ní můžeme měřit, jak křehké, měkké, středně tvrdé tak tvrdé materiály.



Obr. 7 Vtisk Rockwellem

Principem této metody je vlačování ocelové kuličky, diamantového kužele nebo kuličky z tvrdokovu o poloměru zakřivení $r 0,2$ a vrcholovým úhlem 120° do daného zkušebního tělíska při působení síly F na dvakrát, kolmo směřující k povrchu tělesa po dobu t a následné změření hloubky trvalého vtisku h_3 .

Tvrdość dle Rockwella HR je pak možno vypočítat jako rozdíl smluvní hloubky vnikání (dle metody) a hloubky trvalého vtisku h_3 podle vztahu:[10]

- Pro metodu HCR – tělískem diamantový kužel

$$HBR = 130 - h_3$$

- Pro metodu HBR – tělískem kulička

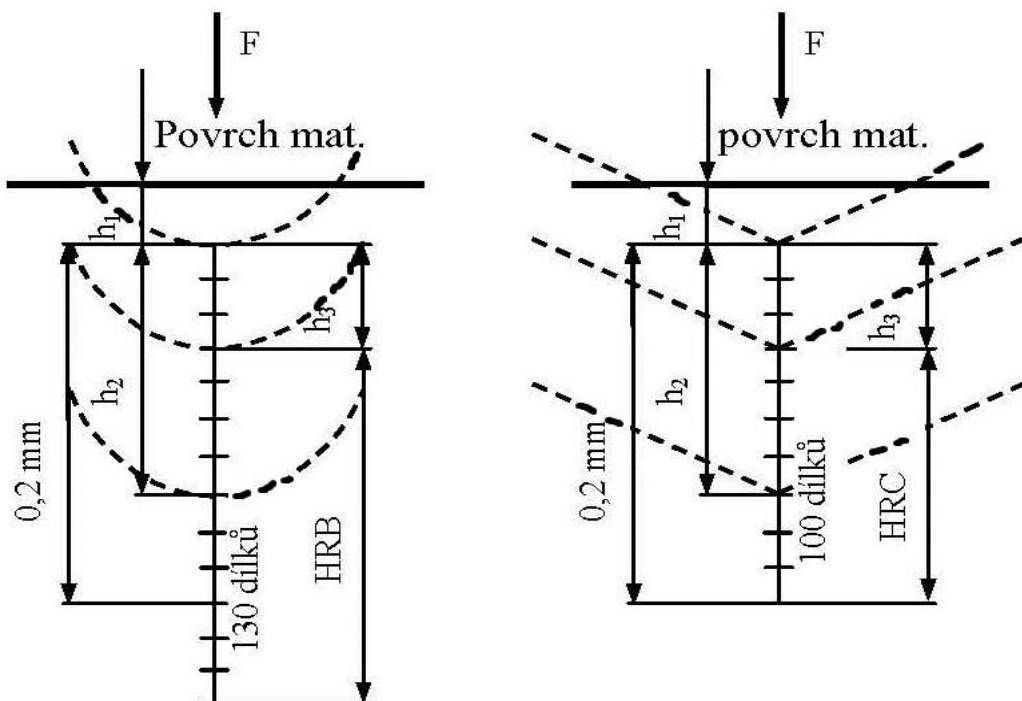
$$HBR = 130 - h_3$$

Kde rozumíme:

HRC,HBR – tvrdość dle Rockwella (bez rozměru)

h_3 – jako hloubku trvalého vtisku (mm)

100,130 – smluvní hloubka (mm)



Obr. 8 Schéma měření dle Rockwella

Provedení zkoušky:

Zkoušený vzorek musí být během zkoušky umístěn na tuhém podkladu. Je nutné, aby během zkoušky nedošlo k jeho pohnutí. Zkoušku poté provádíme na hladkém a rovném povrchu, bez cizích tělísek a mazadel. Proces provádíme za teploty 10 – 35°C.

Vnikající těleso je vtlačováno do povrchu vzorku zatížením jež má směr kolmo na jeho povrch, bez rázů až do dosáhnutí hodnoty předzatížení. Po dosažení této hodnoty, dochází k nulování měřicího zařízení hloubky vtisku.

Trvání hlavního zatížení se pohybuje v rozmezí 2 - 8 s.

Doba, po kterou působí celkové zatížení je:

- 1-3 s u těch materiálů, které nejeví závislost plastické deformace na čase.
- 1-5 s u materiálů, jenž vykazují omezenou závislost plastické deformace na čase
- 10-15 s u materiálů, které vykazují velmi silnou závislost plastické deformace na čase.

Rozmezí mezi dvěma středy dvou sousedních vtisků musí být aspoň 4 násobkem průměru vtisku, ale také nejméně 2mm. Poté vzdálenost středu vtisku od kraje daného vzorku je nutná být alespoň 2,5 násobná průměru vtisku. [11]

Zápis hodnoty tvrdosti

Tvrdot dle Rockwella vyjadřujeme čísly, které nám vyjadřují hodnotu tvrdosti a přidáme písmena HR se zápisem stupnice tvrdosti

Pro příklad : 60 HRC – tvrdost je 60

72 HR 25 N – tvrdost je 72, zatížení 249,8 N (25 kp).

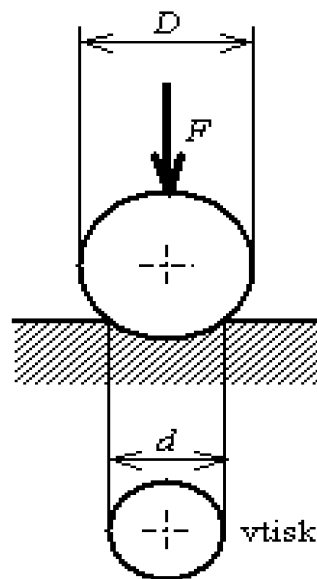


Obr. 9 Tvrdoměr typu Rockwell

2.1.2 Tvrdoměr podle Brinella

Tato metoda byla poprvé představena roku 1900 švédským inženýrem Johanem Augustem Brinellem v Paříži, na mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálů. Zkouška se v praxi rychle ujala a je využívána dodnes.

Princip zkoušky spočívá v zatlačení silou vnikající tělísko (zpravidla ocelové kalené kuličky nebo kuličky z tvrdokovu s průměrem D) do povrchu vzorku. Tvrdoměr poté vyjádříme poměrem zatížení na plochu kulovitého vtisku. Pro materiály jejichž tvrdost dle Brinella dosahuje maximálně hodnoty 450 HB používáme ocelovou kuličku. Kuličku z tvrdokovu poté zvolíme pro materiály maximálně do 650 HB. Hodnoty naměřené využitím ocelové kuličky a z tvrdokovu jsou podstatně odlišné při tvrdosti nad 350 HB [12]



Obr. 10 Zkouška Brinell

Tvrдост dle Brinella HBS, HBW je dána vztahem

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

F působící síla [N]

D průměr kuličky [mm]

d průměr vtisku [mm]

koeficient 0,102 $0,102 = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,80665}$ [13]

Provedení zkoušky

Měřený materiál musí mít hladký, rovný povrch v ideálním případě broušený bez obsahu mazadel. Tloušťka vzorku musí být minimálně 0,6 D měřící kuličky. V prvním kroku umístíme měřený materiál na hladkou, čistou podložku měřícího přístroje. Poté do měřeného materiálu kolmo vtlačíme za daného zatížení F po dobu t kuličku s průměrem D. Po

následném odlehčení zanechá kulička v měřeném materiálu vtisk viz. Obr. 10. Podle povrchu vtisku kulového vrchlíku poté hodnotíme materiál.

Zápis hodnoty tvrdosti

Výsledek měření tvrdosti obsahuje číslo tvrdosti, symboly HBS, HBW a podmínky zkoušky:

- Průměr kuličky D [N]
- Velikost zkušebního zatížení F [N]
- Doba působícího zatížení při zkoušce v sekundách [14]

Příklad : 500 HBW 5/800

-Tvrlost dle Brinella 500 stanovená kuličkou z tvrdokovu s průměrem 5 mm při zatížení 7,988 kN po dobu 10-15 s.



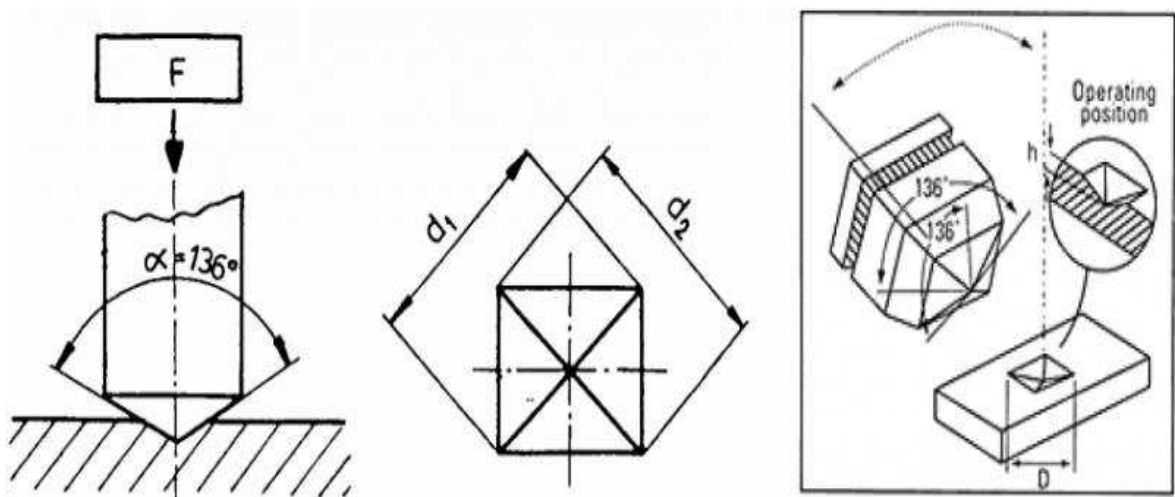
Obr. 11 Tvrdoměr typu Brinell

2.1.3 Tvrdost podle Vickerse

Zkouška vyvinuta roku 1922 v Anglii. Autoři, kteří popsali tuto zkoušku byli

R. L. Smith a G. E. Sandland. Název tato zkouška nese podle jména tvrdoměru firmy Vickers.

Princip Vickersovy zkoušky podobný jako u Brinellovy zkoušky. Jako indentor se používá diamantový jehlan se čtvercovou podstavou a vrcholovým úhlem $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Úhel 136° z důvodu minimálního tření mezi indentorem a vzorkem. Vickersovu metodu charakterizuje vysoká přesnost a je zpravidla využívána k laboratorním účelům (výzkum, kontrola). Tvrdost dle Vickerse je vyjádřena poměrem působícího zatížení k ploše vtisku – podobně jako u Brinellovy metody. [7]



Obr. 12 Princip Vickersovy metody

Tvrdost dle Vickerse HV definujeme jako poměr působícího zatížení F k ploše vtisku čtyřbokého pravidelného jehlanu se čtvercovou základnou

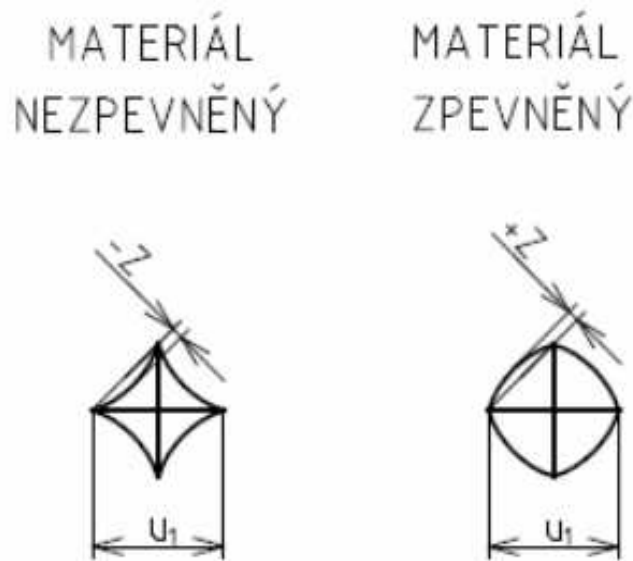
$$HV = \frac{F}{A} = 0,1854 \frac{F}{d^2}$$

HV – tvrdost dle Vickerse (bezrozměrná hodnota) A – povrch vtisku (mm^2)

F – zatížení čtyřbokého jehlanu (N)

d- aritm.průměr úhlopříček vtisku[12]

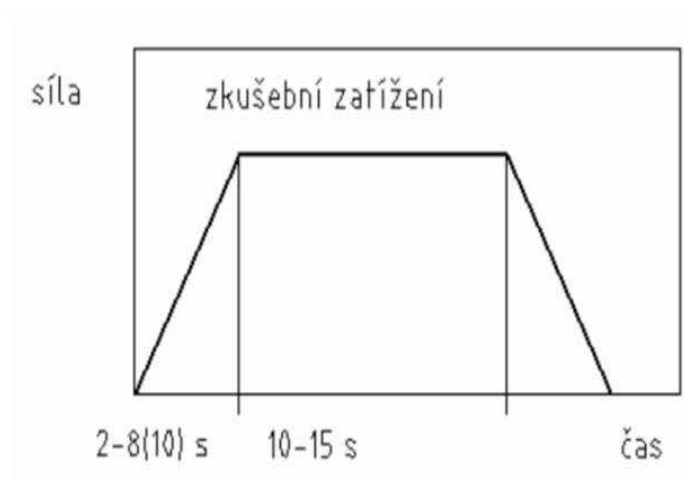
Vickersova zkouška je jako jediná z dosavadních zkoušek, jež splňuje teoretické požadavky. Dává nám jednotnou stupnici tvrdosti od nejměkčích kovů po nejtvrďší kalené ocele. Hodnoty tvrdosti jsou na velikosti zatížení prakticky nezávislé. Za následek rozdílného zpevnění při hranách jehlanu a ve středu ploch nemusí být průměr vtisku přesně čtvercový, ale strany mohou být u měkkých materiálů buď vyduté, nebo vypouklé u zpevněných materiálů. [16, 14]



Obr. 13 Schéma deformace vtisku při Vickersově metodě

Provedení zkoušky :

Zkoušku provádíme při teplotě od 10 – 35°C. Vzorek je nutné při zkoušce položit na tuhou podložku, dbát na čistotu styčných ploch a zamezit pohybu vzorku při zkoušce. Vnikající těleso se kolmým zatížením, bez chvění a rázů zatlačuje do povrchu vzorku. Doba od počátku zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být nižší než 2.s a delší než 8.s. Při malém zatížení nesmí překročit hranici 10.s. Délka působení zkušební síly se pohybuje v rozmezí 10 – 15 s. V některých případech i delší časy, ale s tolerancí $\pm 2s$. viz. Obr. 14.



Obr. 14 Průběh zkoušeného zatížení

Minimální vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být 2,5 násobkem velikosti úhlopříčky (platnost pro litinu, ocel, slitiny mědi a měď) a nejméně 3 násobek velikosti úhlopříčky pro zkoušky olova, cínu a lehkých kovů. Vzdálenost středů sousedních vtisků je nutné nejméně 3 násobek velikosti úhlopříčky (pro litinu, ocel, slitiny mědi a měď) a 6 ti násobek velikosti úhlopříčky při zkouškách olova, cínu a lehkých kovů. Na konci zkoušky se úhlopříčky nesmí lišit na více než 5% střední hodnoty. [15]

Zápis hodnoty tvrdosti

Výsledek měření tvrdosti obsahuje číslo tvrdosti a symbol HV s číslem které odpovídá použitému zkušebnímu zatížení.

Příklad: 180 HV 10

180 tvrdost dle Vickerse, zatížení 98,6 N (10 kp) působící po dobu 10-15 s.



Obr. 15 Tvrdoměr typu Vickers

3 MIKROTVRDOST

Termín mikrotvrdoost se ujal pro tvrdoost určenou využitím zcela malých zařízení, tak aby vznikly vtisky nepatrných rozměrů. Velmi často je označována hodnota 19,8 N jako hranice mezi makrotvrdostí a mikrotvrdostí.

Při makrotvrdosti zjišťujeme tvrdoost kovu jako celku krystalického, při mikrotvrdosti je možné určit tvrdoosti dílčích strukturních součástí kovu. Mikrotvrdoost není možno určit běžnými tvrdoměry, jelikož kladou mnohonásobně větší nárok na přesnost jak při zatížení závažím, nebo přesně cejchovanou pružinkou. K proměření vtisku nám poslouží přesná optika. [18]

3.1 Zkoušky mikrotvrdosti

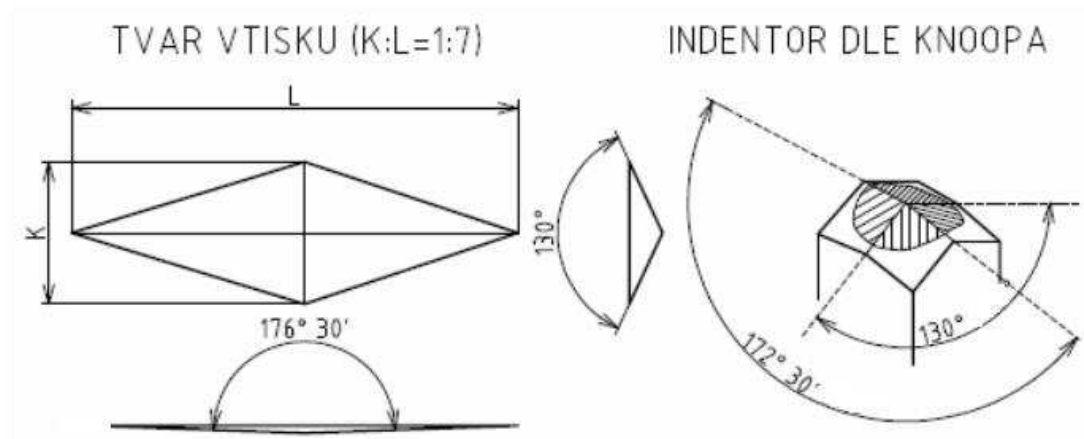
Pro zkoušky mikrotvrdosti jsou upotřebeny pouze vnikací metody s diamantovým indenterem. Prakticky uvažujeme pouze o metodě Knoopově, Bierkovičově a Vickersově.

Vhodnost zkoušek mikrotvrdosti pro :

- malé, tenké součásti
- měření křehkých materiálů
- měření tvrdoosti tenkých povlaků
- ohodnocení svarových spojů
- porovnání rozdílů tvrdoosti na hranici a vnitřku zrn
- změření tvrdoosti strukturních složek nebo fází [18]

3.1.1 Mikrotvrdoost podle Knoopa

Principem zkoušky je vtlačení čtyřbokého diamantového jehlanu s vrcholovými úhly 130° a $172,5^\circ$ do povrchu materiálu. Vtláčení jehlanu do materiálu je hlídáno danou silou do 9,807 N. Výsledný vtisk má poměr úhlopříček v poměru 1:7 - nabývá tvaru kosočtverce a měříme pouze delší úhlopříčku (L) viz. Obr.16. [19]



Obr. 16 Tvar vtisku metodou Knoop

Vztah k výpočtu mikrotvrlosti dle Knoop

$$HK = \frac{1,451 \cdot F}{L^2}$$

HK – tvrdost dle Knoop

L – délka delší úhlopříčky [mm]

F – zkušební zatížení [N][20]

Velikosti zkušebních zatížení při měření tvrdosti podle Knoop

Tabulka 1. Velikost zkušebních zatížení při měření dle Knoop

Zkouška tvrdosti dle Knoop	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HK 0,01	0,09807
HK 0,02	0,1961
HK 0,025	0,2452
HK 0,05	0,4903
HK0,1	0,9807
HK 0,2	1,961
HK 0,3	2,942
HK 0,5	4,903
HK 1	9,807

Provedení zkoušky:

Zkušební těleso je nejprve upevněno na tuhé podložce, aby se zamezilo pohybu během zkoušky.

Indentor se zatlačuje do zkušební tělesa zkušebními zatíženími viz. Tab. 1. jež směřuje kolmo k jeho povrchu. Doba od počátku zatížení až do plné hodnoty nesmí přesáhnout 10s. Rychlost přibližování vnikajícího tělesa musí spadat do rozmezí od 15 $\mu\text{m/s}$ - 70 μm . Délka plného zkušební zatížení musí poté být v rozmezí 10 až 15s. [19]

Označení tvrdosti

Knoopova tvrdost je označována písmenem HK za nímž následuje hodnota popisující zkušební zatížení a doba působení zatížení v sekundách – je li odlišná od předepisované doby 10-15s.

Př.1 :

420 HV 0,1 = tvrdost Knoop 420 při zkušební zatížení 0,9807 N probíhající po dobu 10-15s

Př.2

420 HV 0,1/30 = tvrdost Knoop 420 při zkušební zatížení 0,9807 N probíhající 30 s.

3.1.2 Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Zkouška normována evropskou normou ČSN EN ISO 6507-1 pro 3 oblasti zkušební zatížení viz tab.2 [19]

Tabulka 2. Rozdělení zkoušek dle Vickerse

Oblast zkušební zatížení, F [N]	Symbol tvrdosti	ISO 6507-1:1982
$F \geq 49,03$	$\geq \text{HV } 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Zkouška tvrdosti dle Vickerse - nízké zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Během měření mikrotvrlosti využíváme nízkých zatěžujících sil. Tyto síly mají poté na svědomí velmi malé vtisky, které se nám následně obtížněji měří. Testovaný povrch je nutno upravit povrchově. Vtisky už nezanechávají geometrickou podobnost, tvrdost na konci procesu je v závislosti na velikosti působící síly. Výsledná data nelze porovnávat s makrotvrdoštní zkouškou dle Vickerse.

Dále jsou kladeny nároky na správný průběh – tloušťka zkoušené součásti musí nabývat nejméně 1,5 násobek délky úhlopříčky vtisku. Doba od počátku do maximálního zatížení musí být v intervalu 2-8s. Rychlost zatížení maximálně 0,2 mm.s⁻¹ [7]

Vickers vyjádřil daný případ mikrotvrlosti poměrem zkušebního zatížení na plochu vtisku.

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{0,102 * 2 * F * \sin \frac{136^{\circ}}{2}}{d^2} = 0,1854 \frac{F}{d^2}$$

HV – tvrdost dle Vickerse (bezrozměrná hodnota) A – povrch vtisku (mm²)

F – zatížení čtyřbokého jehlanu (N) d- aritm.průměr úhlopříček vtisku [12]

Příklad označení naměřené mikrotvrlosti podle Vickerse:

- 51,4 HV 0,002 – 51,4 mikrotvrdot podle Vickerse, zatížení 0,0098 N (0,001 kp) při době působení zatížení 10,15s.
- 247,8 HV 0,1/40 – 247,8 mikrotvrdot podle Vickerse, zatížení 0,98 N (0,1 kp) při době působení zatížení 40s. [19]

3.1.3 Zkouška mikrotvrdosti dle Berkoviče

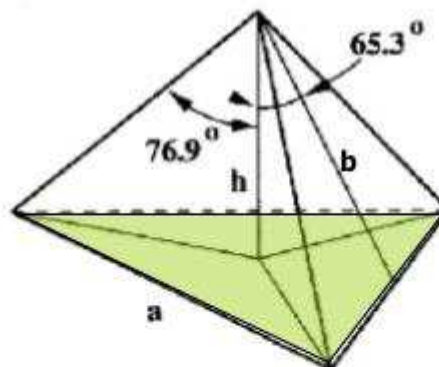
Zkouška dle Berkoviče se průběhem podobá se zkouškou Vickerse. Odlišujícím prvkem je ale zkušební vnikající těleso. Pro Berkovičovu zkoušku je indentor trojboký nepravidelný jehlan o úhlu $65,27^\circ$. A materiál vnikajícího tělesa představuje diamant. Tato metoda našla největší uplatnění u velmi tvrdých materiálů, př. - slinutých karbidů. [20]

Hodnotu tvrdosti určuje vztah $H_{CH} = 1570 \frac{W}{l^2}$

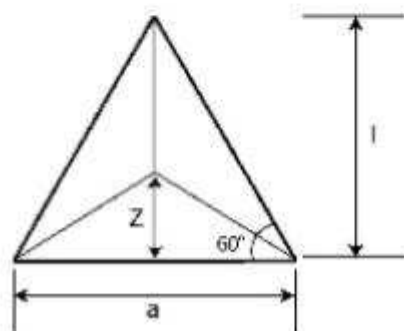
H_{CH} – mikrotvrdost dle Berkoviče

W- zkušební zatížení

l – výška trojúhelníku na vtisku [mm] [20]



Projected area



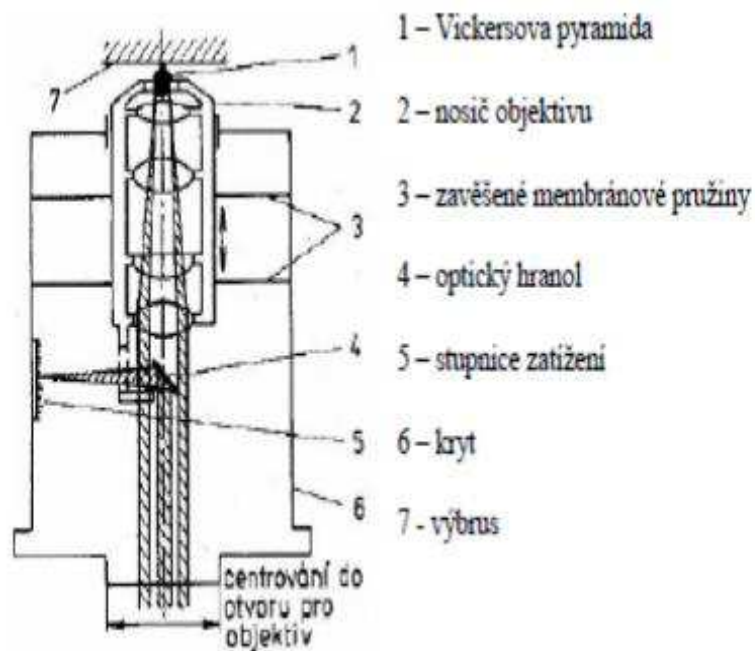
Obr. 17 Geometrie Berkovičova indentoru

4 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI

Rozeznáváme několik typů zařízení :

- Zařízení pro instrumentovanou vnikací zkoušku – DSI
- Samotný mikrotvrdoměr např. Tukon 1102, VMH- 001
- Mikrotvrdoměr + metalografický mikroskop

Metalografické mikroskopy používáme k měření mikrotvrdosti ve spojení s manuální zkouškou dle Hanemanna. U Hanemannova mikrotvrdoměru je měřící objektiv zavěšen na odpružených membránách, jež zajišťují pohyb ve směru optické osy a zároveň při průhybu zajišťují sílu zátěže diamantového jehlanu. Zkoušený metalografický výbrus je upnut na stolek mikroskopu a pomocí jeho oddalování a přibližování se zapříčiní vtlačení diamantového jehlanu do daného místa. Prohnutí membránových pružin, které se rovná zatížení působící na diamant, měříme uvnitř objektivu na obrazu zatěžovací stupnice. Po následném odlehčení a zaostření struktury, změříme rozměry úhlopříčky vtisku pomocí měřícího okuláru. Příslušnou vypočítáme ze vztahu pro výpočet HV, nebo najdeme v tabulkách. [21]



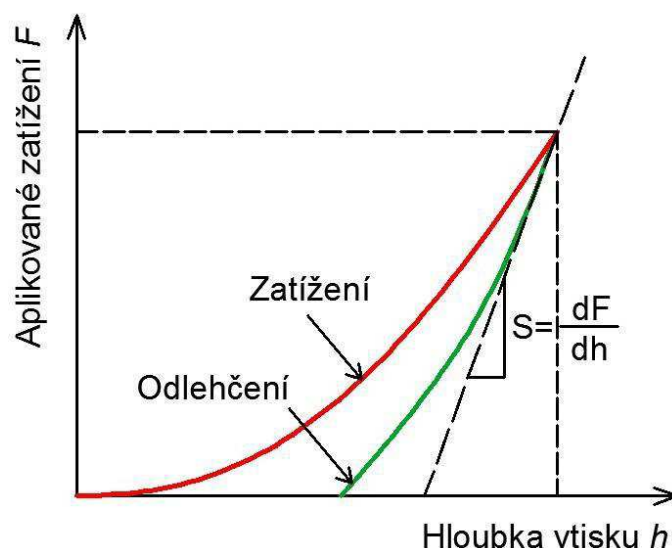
Obr. 18 Hanemannův Mikrotvrdoměr

5 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI

Hlavním důvodem pro vznik této zkoušky byla snaha o zjištění mechanických vlastností na tenkých vrstvách. Tradiční přístroje pro měření mikrotvrdomosti nebyly schopny vytvořit tak malé zatížení, aniž by nebyl pouhou indentací ovlivněn i substrát, na němž byla daná vrstva nanášena. Hlavní nárok byl kladen na celkovou hloubku vtisku, aby se rovnala 10% z celkové hloubky vtisku. Pokud byl vytvořen vtisk dle zadaných nároků, nebylo možné změřit přesně jeho rozměry pomocí optického mikroskopu, kvůli tomu byl využíván elektronový mikroskop, který bohužel práci protahoval a znesnadnil. Určení mikrotvrdomosti se tedy stávalo nepohodlné.

Zkouška DSI (Depth Sensing Indentation) – českým ekvivalentem Instrumentovaná zkouška tvrdosti. Vznik na počátku 80. let.

Principem zkoušky je, že měřicí zařízení současně detekuje okamžitý rozdíl hloubky průniku indentoru do zkoušeného materiálu v závislosti na poklesu nebo nárůstu zatížení v průběhu celkového zatížení/odlehčení. Následným grafickým souhrnem dat dochází ke vzniku charakteristické indentační křivky zatížení-hloubka vtisku. Průběhy zkoušek se ihned zaznamenávají současně s vyhodnocením dalších parametrů materiálu díky spojení PC a měřicího přístroje. [20]



Obr. 19 Indentační křivka

5.1 Indentační křivky

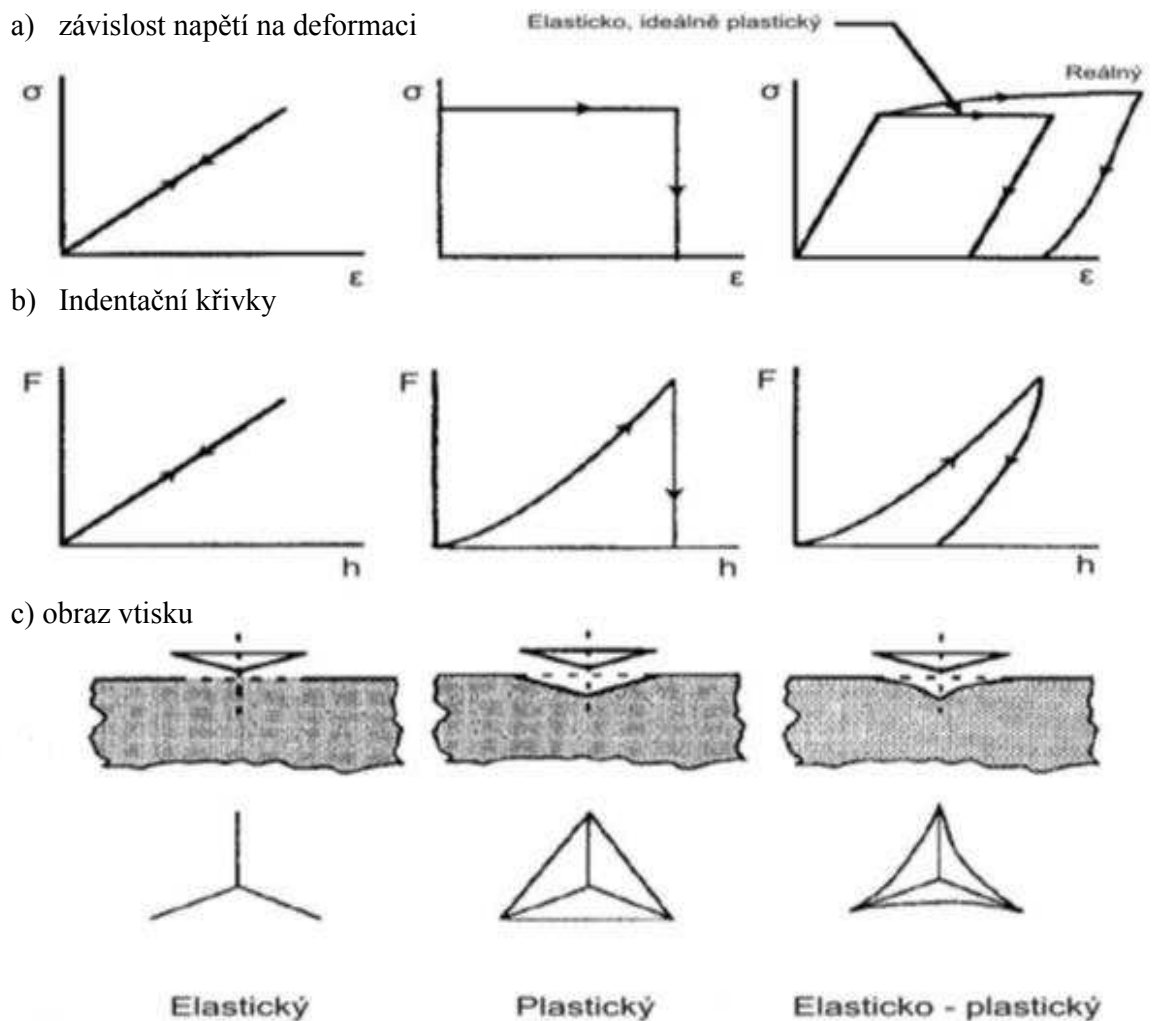
Hlavní vliv na tvar křivky má odezva zkoušeného materiálu na působící zatížení

Dle této odezvy dělíme materiály na 3 typy :

- Plastické
- Elastické
- Elasticko-plastické

Je-li odezva materiálu čistě elastická, nenastává žádná plastická deformace, po odlehčení nevznikne zřetelný vtisk. U těch materiálů, jež mají dokonale plastickou odezvu dochází k trvalému vtisku, jehož hloubka a tvar odpovídá indentoru. Většina strojírenských materiálů ale zanechává dobře zřetelný vtisk na kterém je vidět elastické zotavení. (chová se elasticko-elasticky). [21]

Popsané chování znázorněno na obrázku:



Obr. 20 Schematické znázornění chování materiálu

5.2 Stanovení výsledků zkoušky

5.2.1 Vtiskový modul pružnosti

Pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti DSI, můžeme zjistit vtiskový modul E_{IT} , komplexní modul E^* a také redukovaný modul E_r

Vtiskový modul lze vypočítat:

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

E^* - komplexní modul

ν_s = Poissonův poměr zkoušeného tělesa

Určení komplexního modulu E^* z rovnice :

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}}$$

E_r – redukovaný modul

E_i – modul vnikajícího tělesa [24]

5.2.2 Vtiskové tečení

Změnu hloubky vtisku značíme C_{IT} , výpočet:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100$$

h_1 – hloubka vtisku při dosažení zkušebního zatížení

h_2 – hloubka vtisku při maximálním zkušebním zatížení [24]

5.2.3 Tvrдост

Tvrдост vtisková H_{IT} vyjádříme podělením maximálního zatížení P_{max} s plochou A_p (průmět kontaktu vnikajícího tělíska s povrchem [23])

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p}$$

Tvrдост dle Martense H_M vyjádříme podílem zatížení P_{max} s plochou A_s povrchu části vnikajícího tělíska do materiálu. [23]

$$H_M = \frac{P_{max}}{A_s(h)}$$

5.2.4 Plastická a elastická práce vtisku

Studiem indentačních křivek můžeme zjistit deformační práci

Celkovou práci W_{total} spotřebovanou na vtisk, lze vypočítat jako součet elastické práce W_{elast} a plastické W_{plast} [25]

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast}$$

Dále můžeme spočítat koeficient zpětné relaxace η_{IT} který nám zobrazuje jak se provedený vtisk vrací do původního stavu [25]

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je měření mikro-mechanických vlastností polymerního materiálu PBT(Polybutylen-tereftalát) přístrojem Micro-Combi Tester vyráběným švýcarskou firmou CSM. Materiál je modifikován elektronovým beta zářením v různých dávkách. Bylo zkoumáno, jaký vliv jednotlivých dávek ozáření působí na chování materiálu.

Postup při vypracování bakalářské práce:

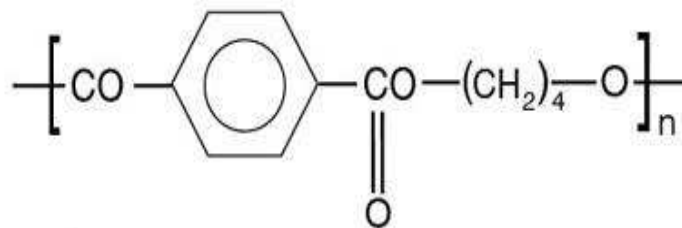
- Vypracování literární studie daného tématu
- Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část
- Provedení experimentu
- Vyhodnocení získaných výsledků

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V praktické části bakalářské práce byly využity vzorky PBT plněného 30 % skelných vláken a vzorky neplněného PBT. Tyto vzorky byly ozářeny elektronovým beta zářením o dávkách 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy . Pozorovali jsme rozdíly mezi těmito vzorky. Měření bylo provedeno metodou DSI, dle Vickersovy zkoušky

7.1 Polybutylen tereftalát (PBT)

PBT je semikrystalický polymer jenž díky vyváženému souboru mechanických a tepelných vlastností řadíme mezi tzv. inženýrské plasty pro náročné aplikace. PBT se vyrábí polykondenzací kyseliny tereftalové nebo dimetyl tereftalátu s 1,4-butanediolom. Využití převážně v elektrotechnice, jeho vlastnosti jsou často upravovány přísadky skelných vláken, mletých minerálů, samozhášecích přísad.



Obr.21 Strukturní vzorec PBT [26] [27]

7.1.1 Vlastnosti PBT

- Vysoká pevnost
- Dobrá creepová odolnost při vyšší teplotě
- Rozměrová stálost
- Vysoká tuhost a tvrdost
- Nízké tření a odolnost vůči oděru
- Dobrá odolnost proti povětrnostním vlivům
- Nízká koroze pod napětím
- Výborná chemická odolnost [26][28]

7.1.2 Aplikace PBT

Využití převážně v elektrotechnice jako elektrické a elektronické díly (konektory, vypínače, zásuvky, cívky, osvětlovací technika) poté dále v automobilovém průmyslu jako komponenty elektrických systémů, části spalovacích systémů, čidla a v neposlední řadě jako kryty a pouzdra spotřebičů, kalkulačky, klávesnice, galanterní zboží (zipy), apod.



Obr. 22 Příklady aplikací PBT [3]

7.2 Parametry vstřikování zkušebních vzorků

Příprava zkušebních vzorků byla provedena technologií vstřikování, na strojích firmy ARBURG, označení stroje - Allrounder 470H. Nastavení parametrů vstřikování bylo provedeno dle doporučení výrobce.

Tabulka 3. Procesní a teplotní parametry vstřikování

PBT V-PTS-CREATEC-B3HZC M800/25	
Parametry vstřikování	
Vstřikovací rychlost [mm/s]	50
Vstřikovací tlak [MPa]	85
Čas vstřikování [s]	0,8
Čas chlazení [s]	40
Teplota formy [°C]	60
Dráha dávkování [mm]	40
Celkový čas dotlaku [s]	10
Dotlak [MPa]	12

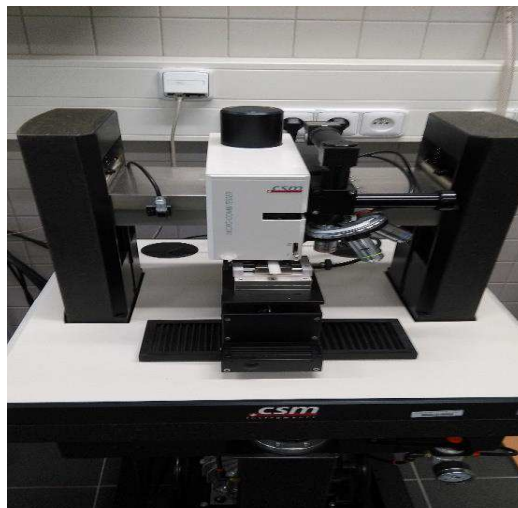
Teploty pásem plastikační jednotky	
Teplota pod násypkou [°C]	30
Pásmo 1 [°C]	220
Pásmo 2 [°C]	230
Pásmo 3 [°C]	240
Pásmo 4 [°C]	250

7.3 Sítování zkušebních vzorků

Aplikace beta záření na zkušební vzorky proběhla za pokojové teploty v závodě Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG na pobočce Saal an der Donau. Jako zdroj záření byl použit toroidní elektronový urychlovač Rhodotron -10 MeV-200 kW. Rozsah dávek záření byl stanoven dle doporučení závodu v rozmezí 33 – 198 kGy. S každým průjezdem pod scannerem elektronového urychlovače byla aplikována dávka záření o velikosti 33 kGy. Absorbovanou dávkou záření poté ověřil dozimetr a následně byla stanovena fotomericky zkušebním přístrojem Spectronic Genesys 5.

7.4 Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti

Měření bylo provedeno na přístroji MICRO-COMBI-TESTER firmy CSM. Měření provedeno na každém vzorku 10 krát. Aplikované zatížení při zkoušce 0,5 a 5 N. Výdrž při maximálním zatížení 90 s. Zatěžující a odtěžující rychlost – 1N/min a 10N/min. Vnikacím tělískem byl čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136°



Obr. 23 Micro Combi Tester

7.5 Postup měření

Experiment byl proveden v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství Fakulty technologické ve Zlíně pomocí zařízení Micro-Combi Tester. Pro jednotlivé zatížení každého vzorku bylo provedeno 10 měření a byly vyhodnocovány veličiny:

- Tvrdost dle Vicerse H_{VIT}
- Vtisková tvrdost H_{IT}
- Vtiskový modul pružnosti E_{IT}
- Koeficient zpětné relaxace η_{IT}
- Plastická část práce vtisku W_{plast}
- Elastická část práce vtisku W_{elast}
- Celková mechanická práce vtisku W_{total}
- Creep C_{IT}

8 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Tato kapitola obsahuje naměřená data ve formě tabulek a grafů. Obsahem tabulek jsou průměrné hodnoty ze souboru měření a ty dále zaznamenány do grafů. Bylo provedeno 10 měření a statistické vyhodnocení pro každý vzorek.

8.1 Použité veličiny

- Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- Směrodatná odchylka:

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

\bar{x} = aritmetický průměr

s = směrodatná odchylka

x_i = i-tá hodnota měřené veličiny

n = počet měření

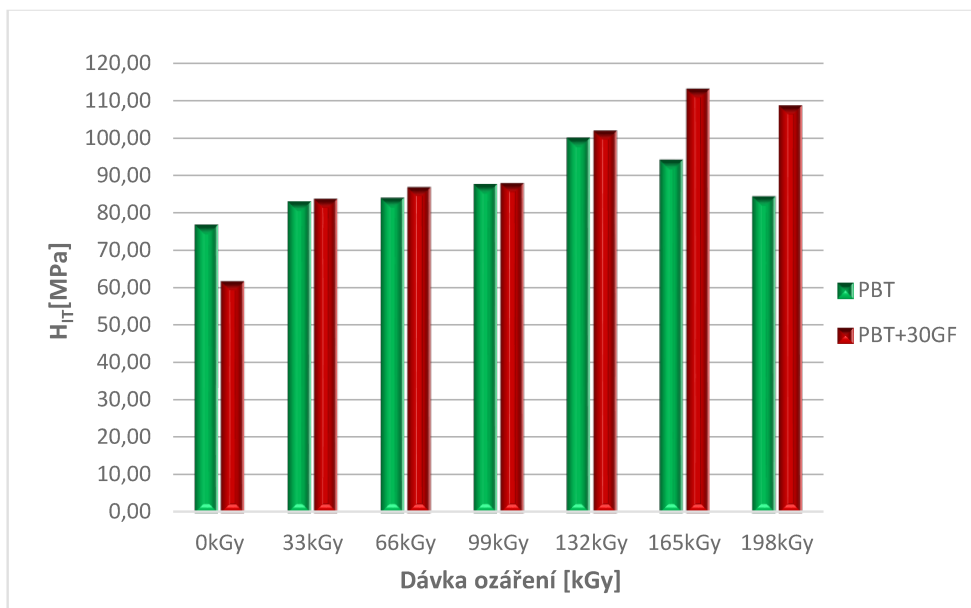
8.2 Zkušební zatížení 0,5 N

Tabulka 3. Naměřené hodnoty pro PBT neplněný (0,5N)

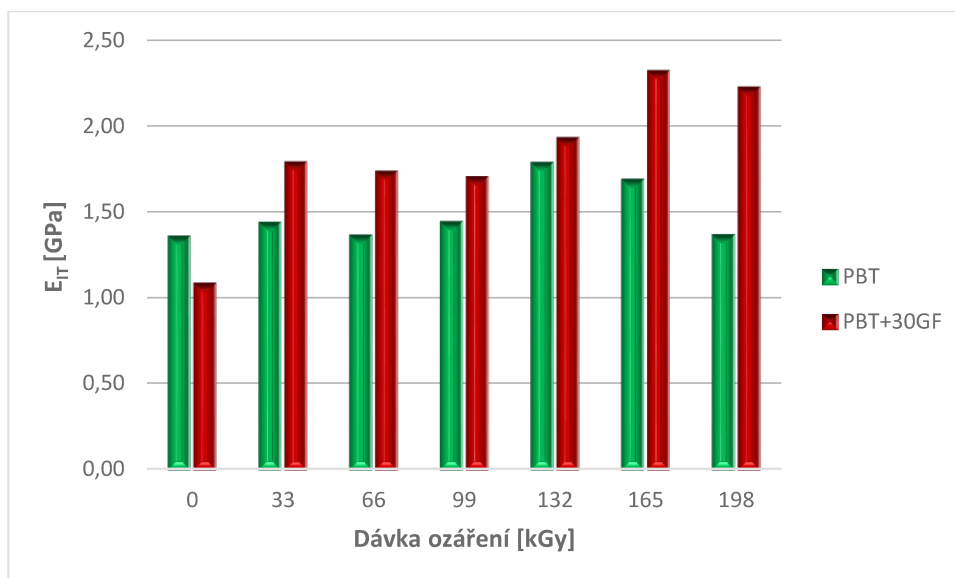
ozáření		0kGy	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
H_{IT} [Mpa]	\bar{x}	76,40	82,67	83,64	87,29	99,69	93,81	84,04
	s	4,03	8,81	4,07	4,16	5,52	3,15	5,96
E_{IT} [Gpa]	\bar{x}	1,35	1,43	1,36	1,44	1,78	1,68	1,36
	s	0,06	0,10	0,06	0,09	0,04	0,04	0,06
C_{IT} [%]	\bar{x}	6,95	6,54	6,28	6,03	5,99	7,96	5,88
	s	0,49	0,49	0,16	0,13	0,33	0,18	0,28
HV_{IT} [Vickers]	\bar{x}	7,21	7,80	7,89	8,24	9,41	8,85	7,93
	s	0,38	0,83	0,38	0,39	0,52	0,28	0,56
W_{elast} [μJ]	\bar{x}	1,58	1,53	1,64	1,58	1,33	1,39	1,63
	s	0,32	0,46	0,41	0,30	0,50	0,16	0,35
W_{plast} [μJ]	\bar{x}	2,17	2,10	2,02	1,97	1,87	2,14	1,97
	s	0,41	0,28	0,40	0,51	0,91	0,52	0,34
W_{total} [μJ]	\bar{x}	3,75	3,62	3,66	3,56	3,20	3,52	3,60
	s	0,07	0,05	0,07	0,08	0,14	0,06	0,05
n_{IT} [%]	\bar{x}	42,21	42,10	44,79	44,53	41,66	39,40	45,36
	s	0,36	0,89	0,51	0,39	0,66	0,58	0,70

Tabulka 4. Naměřené hodnoty pro PBT plněný 35% skelných vláken (0,5N)

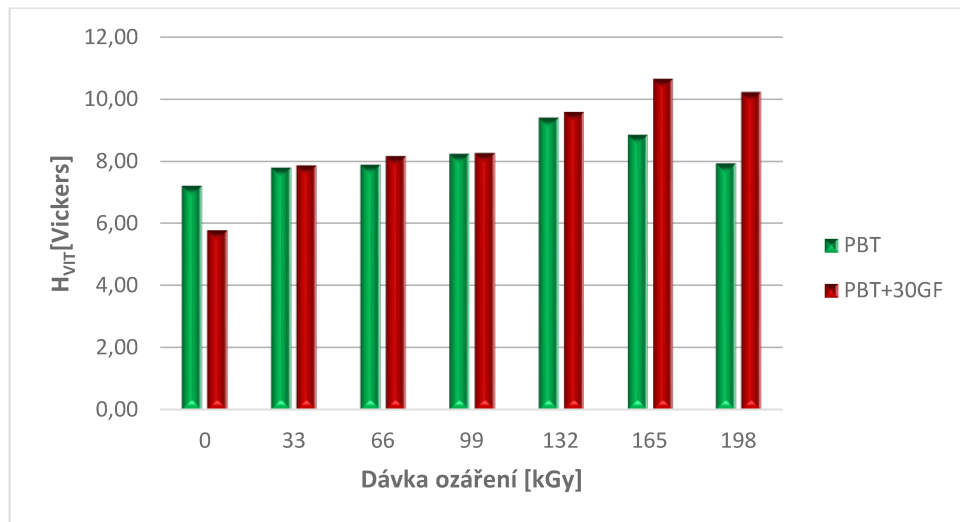
ozáření		0kGy	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
H_{IT} [Mpa]	\bar{x}	61,26	83,34	86,47	87,52	101,56	112,79	108,35
	s	7,84	5,22	5,47	6,09	9,06	7,04	12,85
E_{IT} [Gpa]	\bar{x}	1,09	1,79	1,74	1,70	1,93	2,32	2,22
	s	0,11	0,20	0,16	0,16	0,17	0,30	0,25
C_{IT} [%]	\bar{x}	10,84	10,24	9,67	9,86	8,32	7,65	7,81
	s	1,17	0,74	0,62	0,92	0,67	0,64	1,05
HV_{IT} [Vickers]	\bar{x}	5,78	7,87	8,16	8,26	9,59	10,65	10,23
	s	0,74	0,49	0,52	0,57	0,86	0,66	1,21
W_{elast} [μJ]	\bar{x}	1,74	1,30	1,30	1,30	1,21	1,06	1,10
	s	0,12	0,04	0,08	0,10	0,07	0,08	0,02
W_{plast} [μJ]	\bar{x}	3,02	2,53	2,47	2,50	2,24	2,09	2,10
	s	0,27	0,13	0,16	0,17	0,15	0,20	0,16
W_{total} [μJ]	\bar{x}	4,76	3,82	3,77	3,80	3,45	3,15	3,20
	s	0,37	0,12	0,22	0,23	0,18	0,24	0,16
n_{IT} [%]	\bar{x}	36,66	33,99	34,49	34,25	35,14	33,71	34,48
	s	1,60	1,48	1,11	1,63	1,72	1,90	1,60

Obr. 24 Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 0,5 N

Z obrázku (Obr. 24) můžeme vyčíst, že nejnižší hodnoty vtiskové tvrdosti byly naměřeny u obou vzorků při nulové dávce záření. U neplněného PBT o velikosti 76,4 MPa a u PBT plněného 30% skelných vláken činila hodnota 61,26 MPa. Naopak nejvyšší hodnotu dosáhl neplněný PBT při dávce záření 132 kGy o velikosti 99,69 MPa, plněný PBT při dávce záření 165 kGy hodnotu 112,79 MPa. Procentuální rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou je tedy u neplněného PBT přibližně 30,5% a u plněného PBT přibližně 84,1 % .

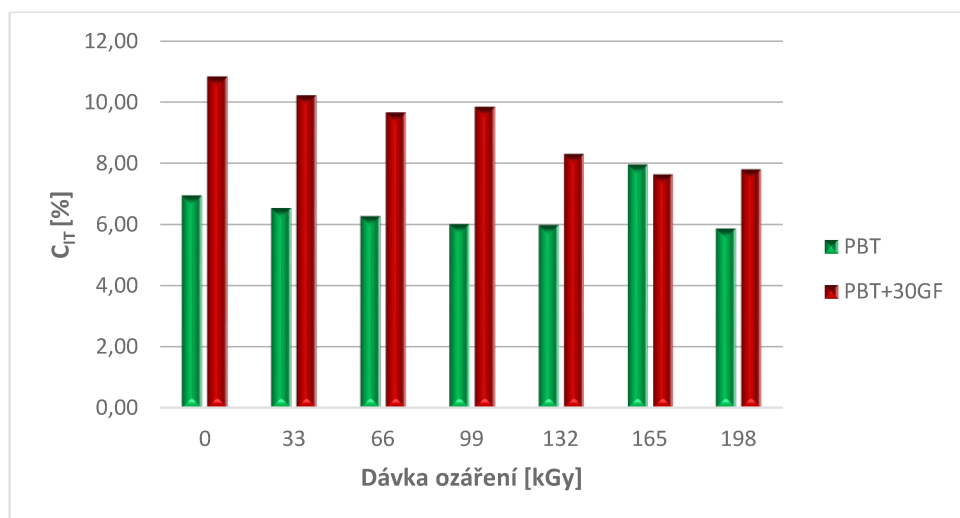
Obr. 25 Vtiskový modul E_{IT} při zatížení 0,5 N

Z obrázku (Obr. 25) je zřejmé, že nejnižší hodnoty vtiskového modulu E_{IT} opět vykazovaly neozářené vzorky. U neplněného PBT o velikosti 1,35 GPa a u PBT plněného činila hodnota 1,09 GPa. Nejvyšší hodnotu dosáhl neplněný PBT opět při dávce záření 132 kGy o velikosti 1,78 GPa a plněný PBT při dávce záření 165 kGy hodnotu 2,32 GPa. Procentuálním rozdílem u neplněného PBT přibližně o 31,9 % a u plněného PBT přibližně 112,8 % .



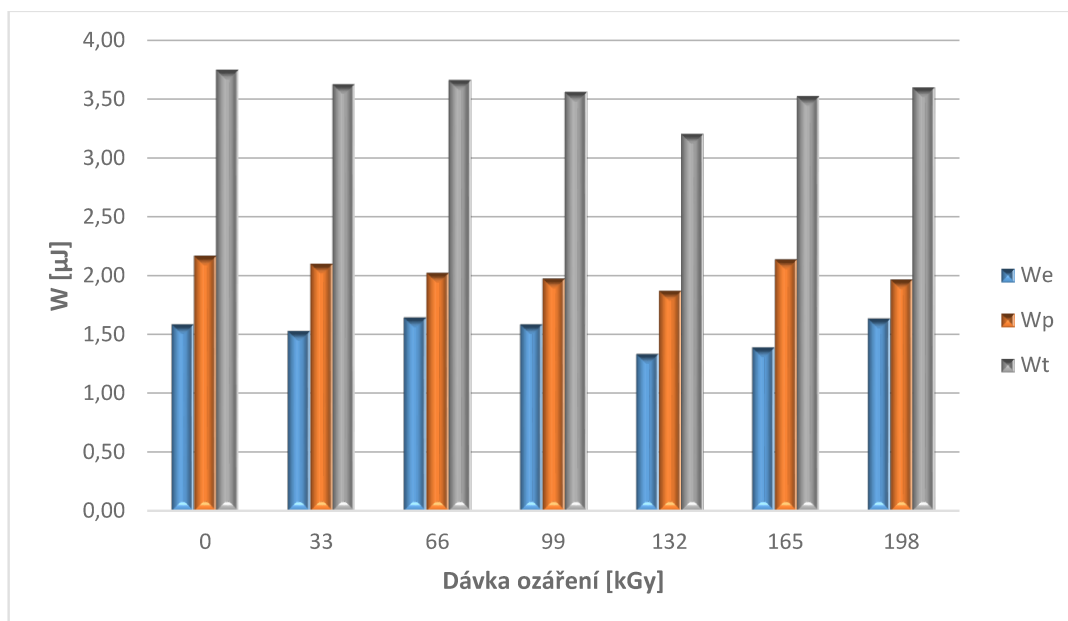
Obr. 26 Vickersova tvrdost H_{VIT} při zatížení 0,5 N

Při vyhodnocení Vickersovy tvrdosti H_{VIT} , nejnižší hodnoty byly opět zaznamenány u neozářených vzorků. U neplněného PBT o velikosti 7,21 Vickers a u PBT plněného činila hodnota 5,78 Vickers. Nejvyšší hodnotu dosáhl neplněný PBT při dávce záření 132 kGy o velikosti 9,41 Vickers a plněný PBT při dávce záření 165 kGy hodnotu 10,65 Vickers. Procentuálním rozdílem tedy u neplněného PBT přibližně o 30,5 % a u plněného přibližně 45,7 %.



Obr. 27 Vtiskové tečení C_{IT} při zatížení 0,5 N

V případě creepového chování nejnižší hodnoty byly zaznamenány u neplněného PBT o velikosti C_{IT} 5,88 % při dávce ozáření 198 kGy a u PBT plněného hodnota C_{IT} 7,65 % při dávce 165 kGy. Nejvyšší hodnotu dosáhl neplněný PBT při dávce ozáření 165 kGy o velikosti C_{IT} 7,96 % a plněný PBT na neozářeném vzorku o hodnotě C_{IT} 10,84 %. Procentuální pokles vtiskového tečení tedy u neplněného PBT přibližně o 35,4% a u plněného PBT přibližně 41,1 %.



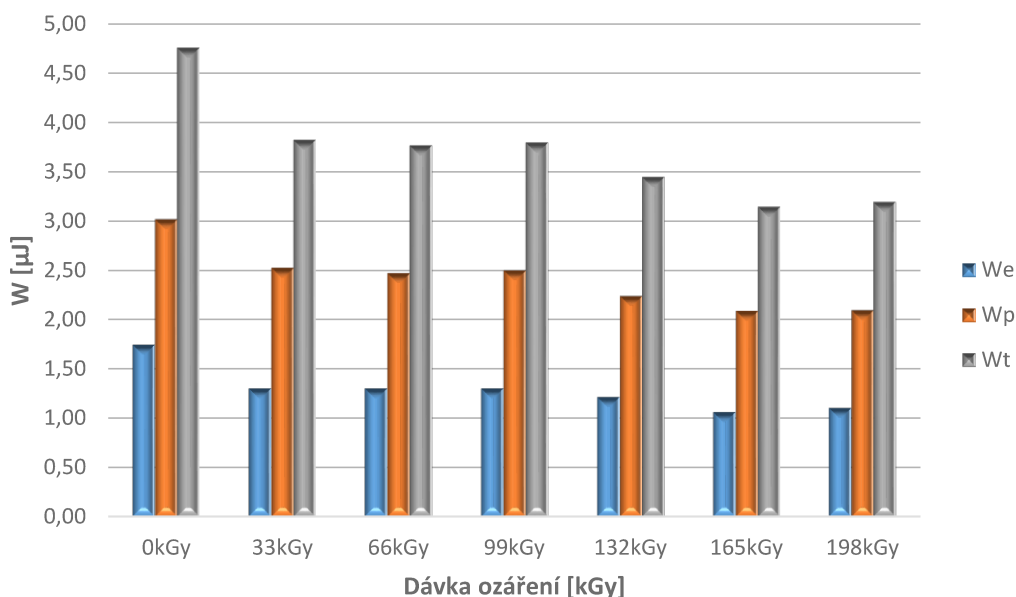
Obr. 28 Deformační práce W při zatížení 0,5 N – neplněný PBT

V grafu deformační práce (Obr. 28) byla zaznamenána naměřená elastická deformační práce (W_e), plastická deformační práce (W_p) a celková deformační práce (W_t) pro neplněný PBT.

Nejmenší hodnota elastické práce byla naměřena při dávce ozáření 132 kGy o velikosti 1,33 μJ. Největší hodnota 1,64 μJ náleží vzorku s dávkou ozáření 66 kGy. Odchylka tedy mezi největší a nejmenší hodnotou je 23,3 %.

Z vyhodnocení grafu pro plastickou deformační práci vyčteme nejmenší naměřenou hodnotu u vzorku s dávkou ozáření 132 kGy o velikosti 1,87 μJ. Naopak nejvyšší hodnota 2,17 μJ odpovídá neozářenému vzorku. Tyto hodnoty nabývají rozdílu okolo 16 %.

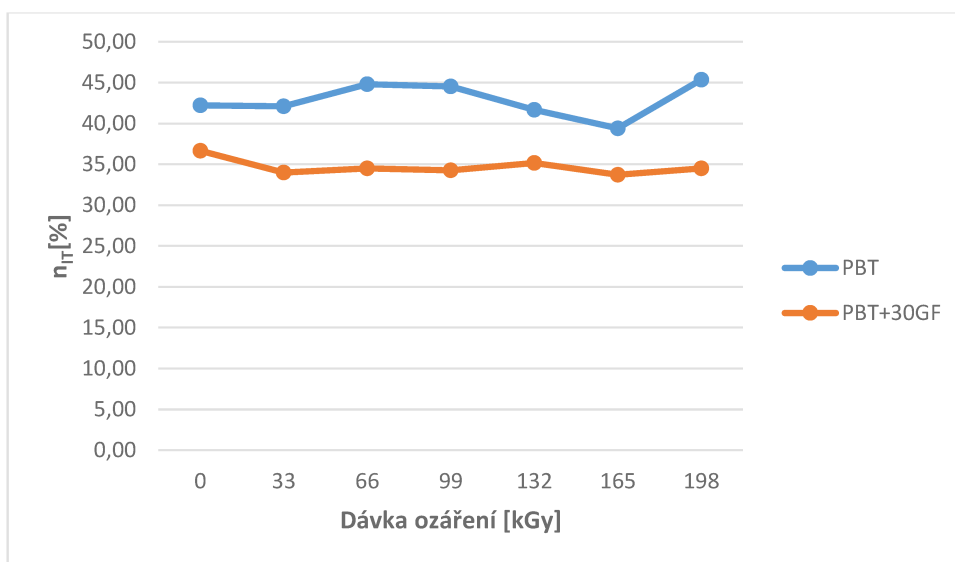
Z dat pro celkovou deformační práci lze označit dávku ozáření 132 kGy o hodnotě 3,20 μJ jako nejmenší. Největší hodnota poté byla opět naměřena u neozářeného vzorku a to 3,75 μJ. Procentuální rozdíl tedy 17 %.



Obr. 29 Deformační práce W při zatížení 0,5 N PBT plněný

U PBT plněného 30 % skelných vláken dosahoval neozářený vzorek opět nejvyšších hodnot. Nejnižších hodnot deformací dosahoval vzorek ozářený dávkou 165 kGy

U elastické deformační práce byl nárůst mezi nejmenší a nejvyšší hodnotou o 64 % u plastické deformační práce o 44 % a u celkové deformační práce 51 %.



Obr. 30 Koeficient zpětné deformace při zatížení 0,5 N

Vyšších hodnot koeficientu zpětné deformace vykazoval neplněný PBT, jeho nejvyšší hodnota byla zjištěna při dávce ozáření 198 kGy. Nejnižší byla naměřena na vzorku s ozářením 165 kGy. U plněného PBT vykazoval nejvyšší hodnotu neozářený vzorek a naopak nejnižší při dávce ozáření 165 kGy.

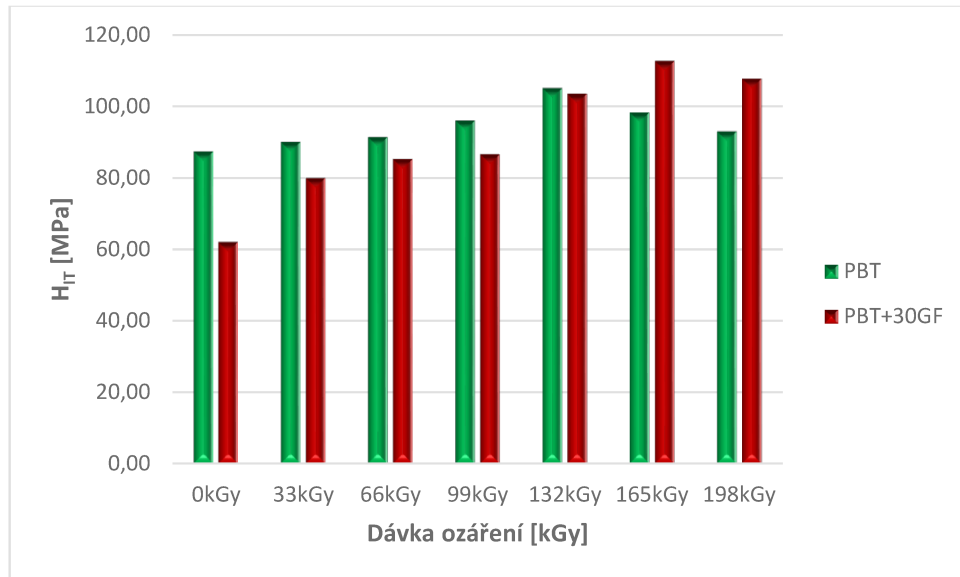
8.3 Zkušební zatížení 5 N

Tabulka 5. Naměřené hodnoty pro PBT neplněný (5N)

ozáření		0kGy	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
H_{IT} [Mpa]	\bar{x}	87,35	90,04	91,37	95,99	105,07	98,22	92,99
	s	1,73	1,56	1,86	1,33	2,47	1,23	2,65
E_{IT} [Gpa]	\bar{x}	1,74	1,77	1,73	1,80	1,89	1,93	1,74
	s	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,02	0,04
C_{IT} [%]	\bar{x}	6,57	5,82	5,51	5,64	5,70	7,66	5,27
	s	0,12	0,16	0,12	0,14	0,13	0,07	0,14
HV_{IT} [Vickers]	\bar{x}	8,24	8,50	8,62	9,06	9,92	9,27	8,78
	s	0,16	0,15	0,18	0,13	0,23	0,12	0,25
W_{elast} [μJ]	\bar{x}	40,48	40,86	42,08	41,39	40,67	37,80	42,57
	s	0,54	0,31	0,47	0,40	0,51	0,37	0,43
W_{plast} [μJ]	\bar{x}	61,85	59,67	57,55	56,78	56,32	63,43	55,87
	s	0,45	0,31	0,51	1,21	0,82	0,70	0,61
W_{total} [μJ]	\bar{x}	102,33	100,52	99,63	98,17	96,99	101,23	98,45
	s	0,60	0,54	0,83	1,38	0,78	0,94	0,86
n_{IT} [%]	\bar{x}	39,56	40,64	42,24	42,17	41,93	37,34	43,25
	s	0,41	0,16	0,27	0,50	0,55	0,25	0,30

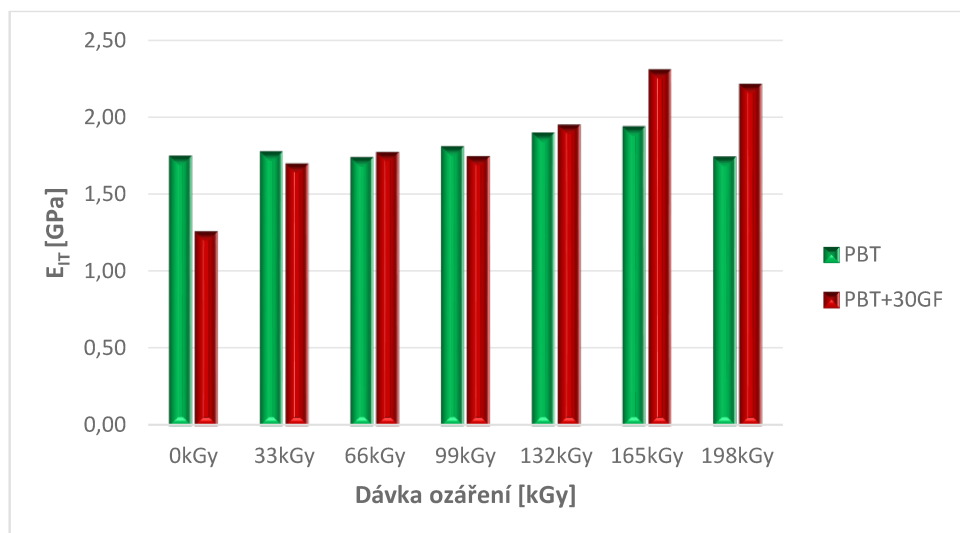
Tabulka 6. Naměřené hodnoty pro PBT plněný 35% skelných vláken (5N)

ozáření		0kGy	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
H_{IT} [Mpa]	\bar{x}	62,17	80,00	85,36	86,69	103,56	112,68	107,80
	s	3,27	3,72	5,56	5,45	6,19	6,17	5,14
E_{IT} [Gpa]	\bar{x}	1,25	1,69	1,77	1,74	1,94	2,30	2,21
	s	0,09	0,09	0,15	0,09	0,17	0,22	0,18
C_{IT} [%]	\bar{x}	9,30	9,68	8,96	8,70	7,56	7,26	6,57
	s	0,31	0,43	0,39	0,50	0,26	0,27	0,29
HV_{IT} [Vickers]	\bar{x}	5,87	7,55	8,06	8,18	9,77	10,64	10,17
	s	0,31	0,35	0,53	0,51	0,58	0,58	0,48
W_{elast} [μJ]	\bar{x}	47,86	39,49	39,26	39,81	36,71	32,80	33,16
	s	2,26	1,27	1,03	1,31	1,12	1,41	0,56
W_{plast} [μJ]	\bar{x}	85,21	75,87	72,71	71,63	64,80	60,08	58,17
	s	2,88	2,65	2,50	2,34	1,77	1,58	1,21
W_{total} [μJ]	\bar{x}	133,07	115,36	111,96	111,44	101,51	92,88	91,33
	s	4,77	3,71	3,26	3,05	2,44	2,77	1,62
n_{IT} [%]	\bar{x}	35,96	34,24	35,07	35,73	36,17	35,31	36,30
	s	0,75	0,53	0,60	0,86	0,73	0,70	0,39

Obr. 31 Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 5 N

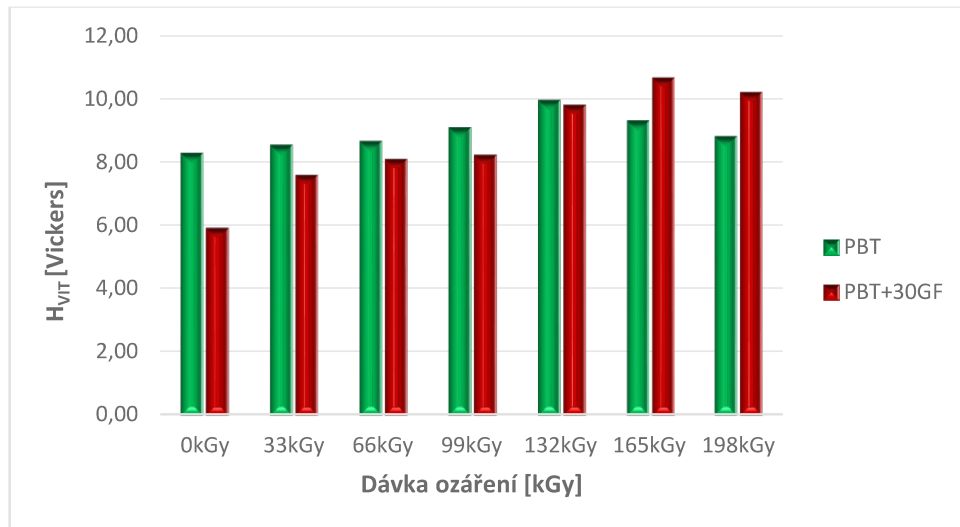
Vtisková tvrdost při zatížení 5 N dosáhla nejvyšší hodnoty u neplněného PBT při ozáření 132 kGy o velikosti 105,07 MPa. Nejnižší hodnota je z grafu patrná u neozářeného vzorku o hodnotě 87,35 MPa. Odchylka mezi největší a nejmenší hodnotou je přibližně 20 %.

U plněného PBT byla naměřena nejvyšší hodnota u ozáření 165 kGy s velikostí 112,68 MPa. Nejnižší opět u neozářeného vzorku o velikosti 62,17 MPa. Procentuelním rozdílem přibližně 81,2 % rozdíl.

Obr. 32 Vtiskový modul E_{IT} při zatížení 5 N

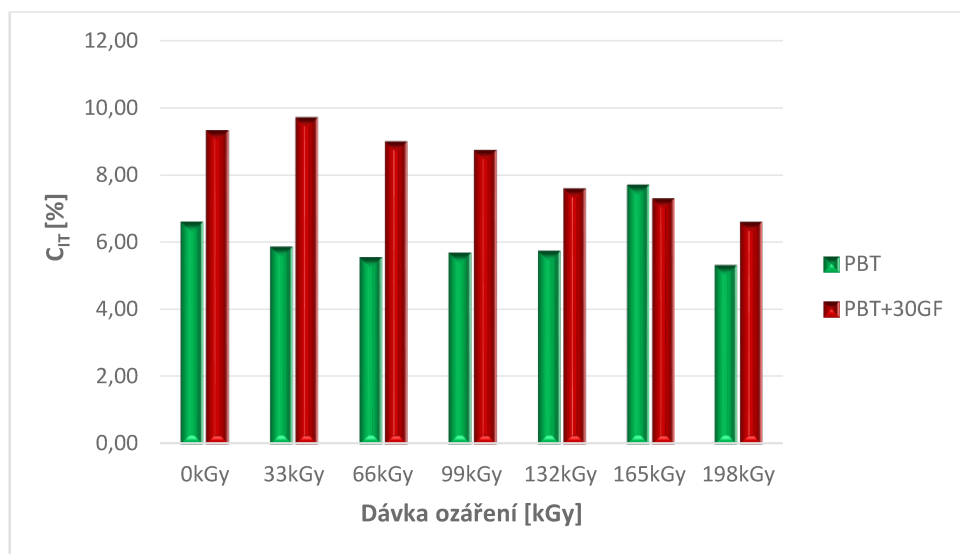
Nejnižší hodnoty vtiskového modulu E_{IT} byly u vzorků velmi podobné. Nejnižší hodnoty u neplněného PBT dosáhl vzorek s ozáření 66 kGy o velikosti 1,73 GPa. U PBT plněného-

činila hodnota 1,25 GPa pro neozářený vzorek. Nejvyšší hodnotu dosáhl neplněný PBT i plněný při dávce záření 165 kGy. Neplněný o velikosti 1,93 GPa a plněný PBT s velikostí 2,30 GPa. Procentuálním rozdílem tedy pro neplněný PBT přibližně o 11,6 % a u plněného PBT přibližně o 84 %.



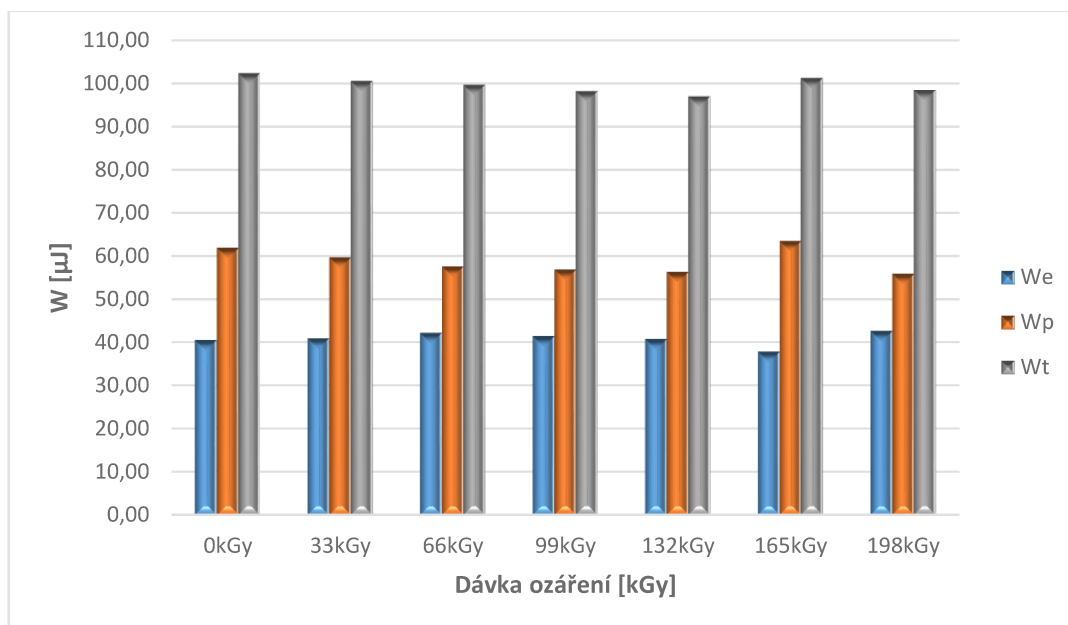
Obr. 33 Vickersova tvrdost H_{VIT} při zatížení 5 N

Nejmenší hodnota Vickersovy tvrdosti byla naměřena u obou materiálů na neozářeném vzorku. U neplněného PBT o velikosti 8,24 Vickers a u PBT plněného činila hodnota 5,78 Vickers. Nejvyšší hodnotu dosáhl neplněný PBT při dávce záření 132 kGy o velikosti 9,92 Vickers a plněný PBT při dávce záření 165 kGy hodnotu 10,64 Vickers. Procentuálním rozdílem tedy u neplněného PBT přibližně o 20,3 % a u plněného PBT přibližně 84 %



Obr. 34 Vtiskové tečení C_{IT} při zatížení 5 N

U creepového chování nejnižší hodnoty byly zaznamenány u neplněného PBT o velikosti C_{IT} 5,51 % při dávce ozáření 66 kGy a u PBT plněného hodnota C_{IT} 6,58% při dávce 198 kGy. Nejvyšší hodnotu dosáhl neplněný PBT při dávce ozáření 165 kGy o velikosti C_{IT} 7,65% a plněný PBT na vzorku s dávkou ozáření 33 kGy o hodnotě C_{IT} 9,68%. Procentuální pokles vtiskového tečení tedy u neplněného PBT přibližně o 38,8% a u plněného PBT přibližně 47,1 %.

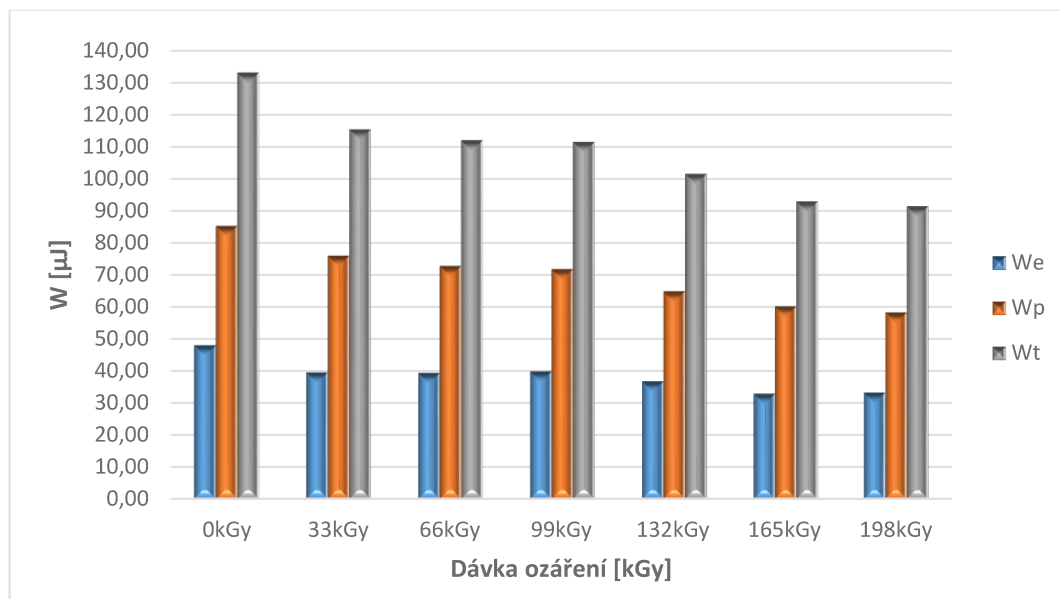


Obr. 35 Deformační práce W při zatížení 5 N – neplněný PBT

Nejmenší hodnota elastické práce byla naměřena při dávce ozáření 165 kGy o velikosti 37,80 μ J. Největší hodnota 42,57 μ J náleží vzorku s dávkou ozáření 198 kGy. Odchylka tedy mezi největší a nejmenší hodnotou je 12,6 %.

Z vyhodnocení grafu pro plastickou deformační práci vyčteme nejmenší naměřenou hodnotu u vzorku s dávkou ozáření 66 kGy o velikosti 57,55 μ J. Naopak nejvyšší hodnota 63,43 μ J odpovídá vzorku s ozářením 165 kGy. Tyto hodnoty nabývají rozdílu okolo 10,2%

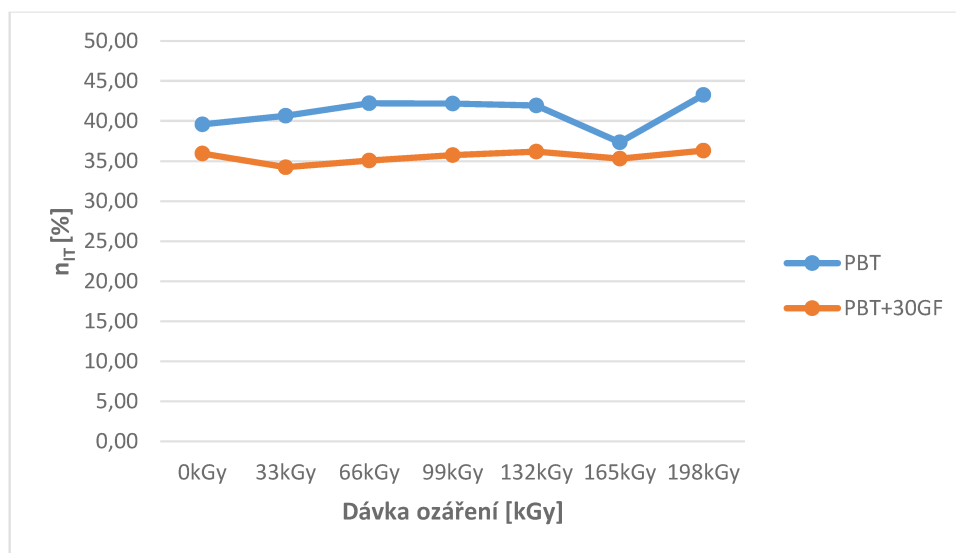
Z dat pro celkovou deformační práci lze označit dávku ozáření 132 kGy o hodnotě 96,99 μ J jako nejmenší. Největší hodnota poté byla opět naměřena u neozářeného vzorku a to 102,33 μ J. Procentuální rozdíl tedy 5,5 %.



Obr. 36 Deformační práce W při zatížení 5 N – plněný PBT

U PBT plněného 30 % skelných vláken dosahoval neozářený vzorek opět nejvyšších hodnot. Nejnižších hodnot deformací dosahoval vzorek ozářený dávkou 165 kGy.

U elastické deformační práce byl nárůst mezi nejmenší a nejvyšší hodnotou o 45,9 % u plastické deformační práce o 46,5 % a u celkové deformační práce 45,7 %.



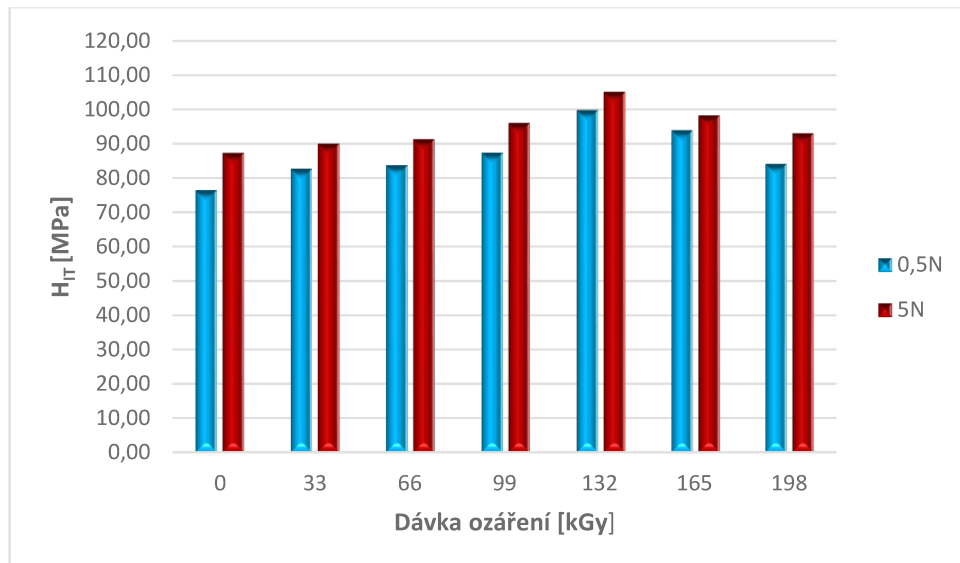
Obr. 37 Koeficient zpětné deformace při zatížení 5 N

Vyšších hodnot koeficientu zpětné deformace vykazoval neplněný PBT, jeho nejvyšší hodnota byla zjištěna při dávce ozáření 198 kGy. Nejnižší byla naměřena na vzorku s ozářením 165 kGy. U plněného PBT vykazoval nejvyšší hodnotu vzorek s ozářením 198 kGy a naopak nejnižší při dávce ozáření 33 kGy.

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

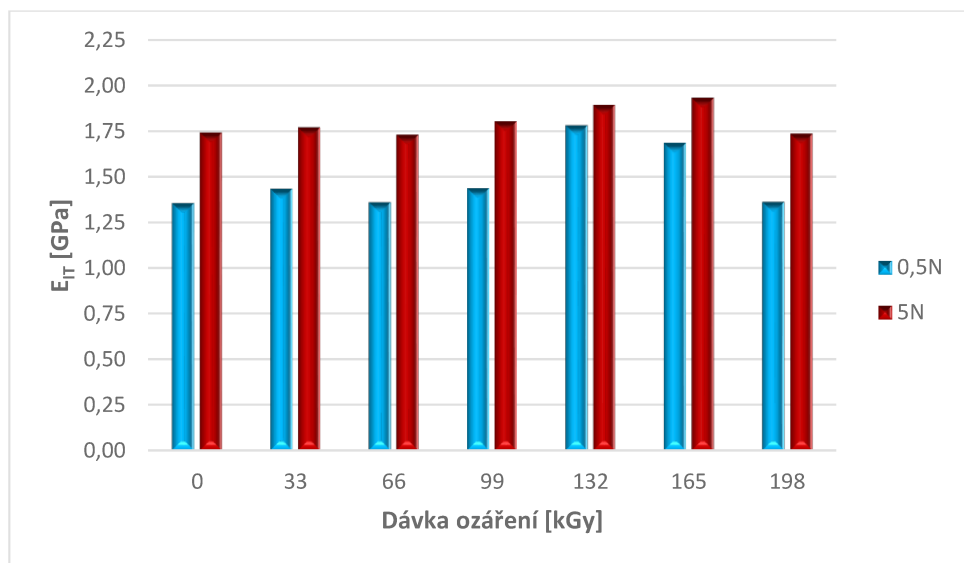
Praktická část bakalářské se zabývala zkoumáním mechanických vlastností a jejich změny u polymerních vzorků, modifikovaných různými dávkami beta záření. PBT neplněného a PBT plněného 30 % skelných vláken.

9.1 Polybutylen-tereftalát neplněný



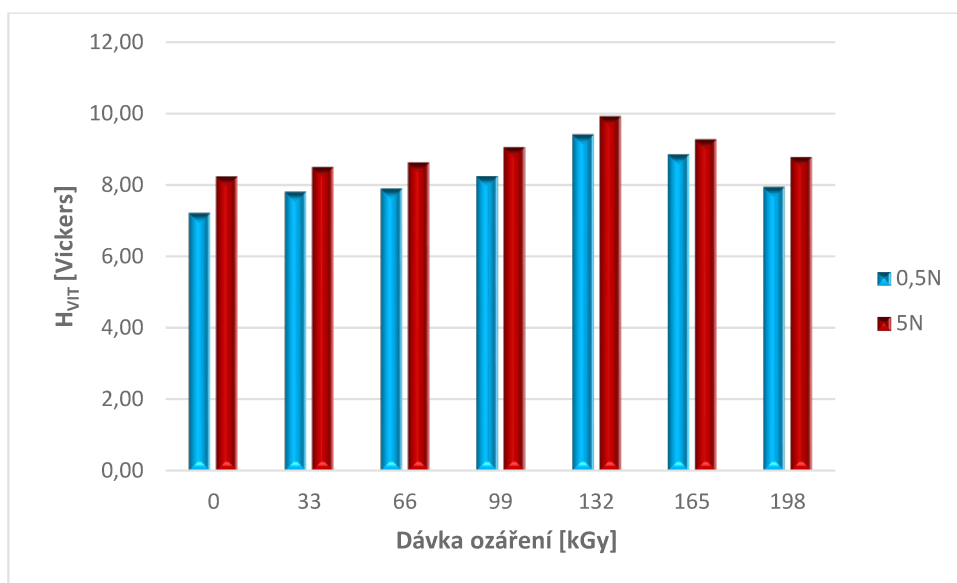
Obr. 38 Porovnání vtiskové tvrdosti H_{IT}

Ze srovnání výsledků vtiskové tvrdosti byly zjištěny nejmenší hodnoty u neozářených vzorků při obou zatížení. Naopak nejvyšší hodnoty byly dosaženy při modifikaci zářením dávky 132 kGy.



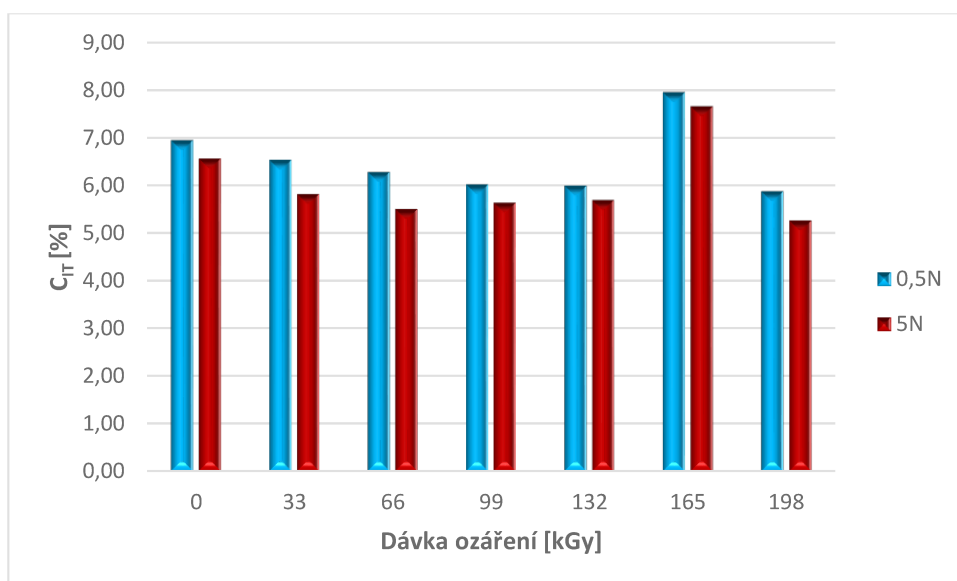
Obr. 39 Porovnání vtiskového modulu E_{IT}

Při porovnání vtiskového modulu byla zjištěna nejnižší hodnota u neozářeného vzorku při zatížení 0,5 N. Při zatížení 5 N byla nejnižší hodnota naměřena při dávce ozáření 66 kGy. Nejvyšší hodnota při zatížení 0,5 N byla zaznamenána u dávky ozáření 132 kGy. Při zatížení 5 N byla nejvyšší hodnota při dávce ozáření 165 kGy.



Obr. 40 Porovnání Vickersovy tvrdosti H_{VIT}

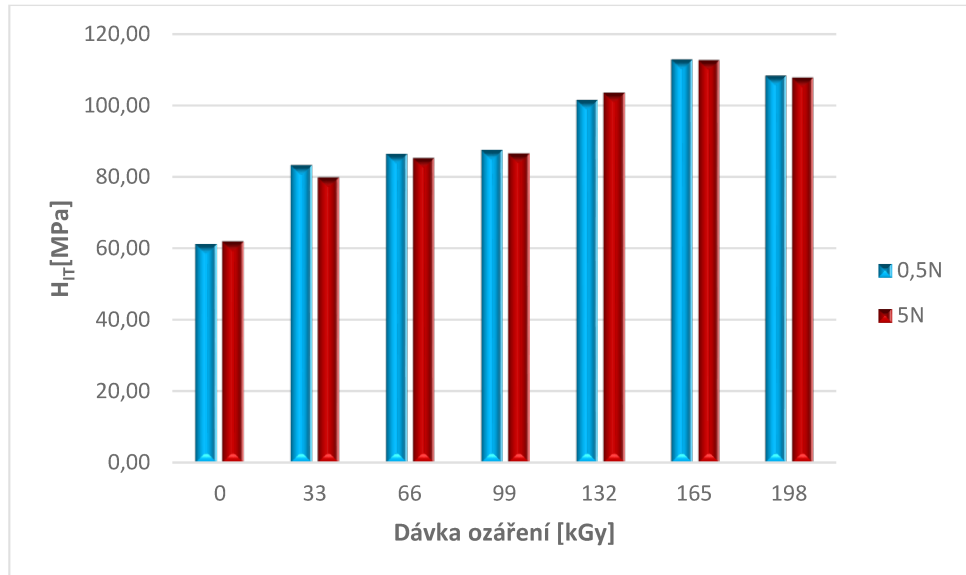
Vickersova tvrdost byla u obou případů zatížení nejmenší u neozářeného vzorku. Nejvyšší poté při dávce ozáření 132 kGy. Stejných výsledků bylo také dosaženo při porovnání vtiskové tvrdosti.



Obr. 41 Porovnání vtiskového tečení C_{IT}

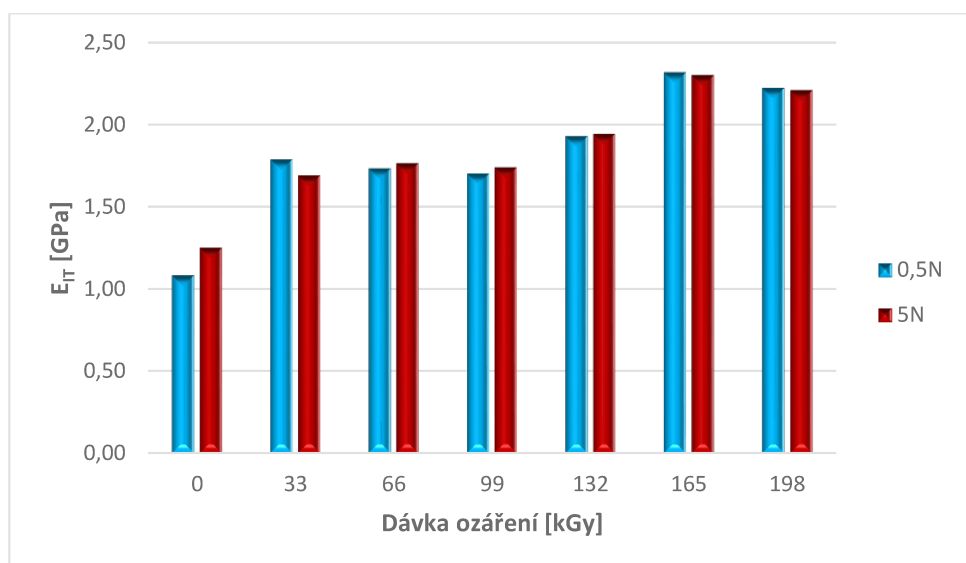
Porovnáním vtiskového tečení bylo dosaženo nejmenších hodnot při obou zatížení u vzorků s dávkou záření 198 kGy. Nejvyšších hodnot poté opět u obou zatížení při dávce ozáření 165 kGy.

9.2 Polybutylen-tereftalát plněný 30% skelných vláken



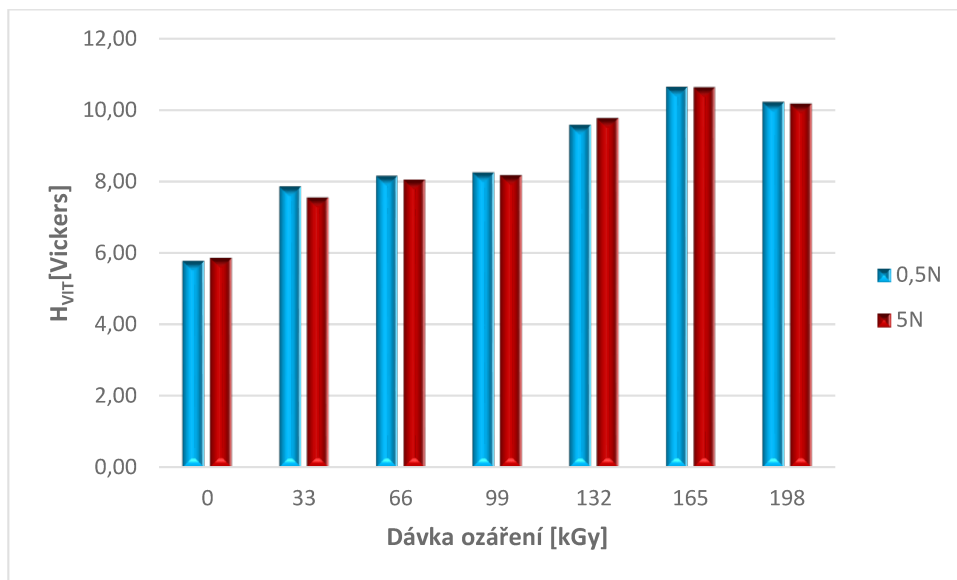
Obr. 42 Srovnání vtiskové tvrdosti H_{IT}

Nejmenší vtisková tvrdost byla zjištěna u plněných vzorků opět u neozářených. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo na rozdíl od neplněných vzorků při ozáření 165 kGy.



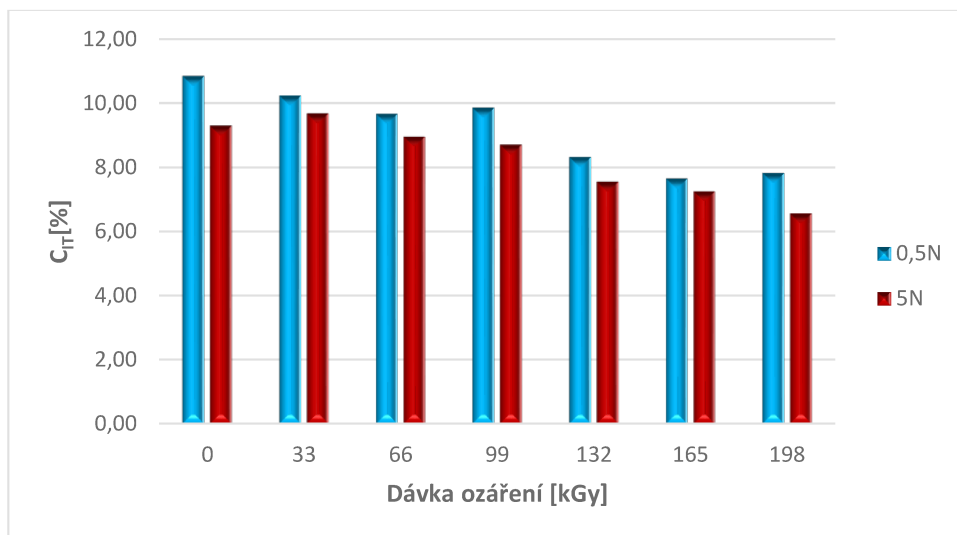
Obr. 43 Srovnání vtiskového modulu E_{IT}

Při porovnání vtiskového modulu opět vykazovaly neozářené vzorky nejnižších hodnot u obou zatížení. Nejvyšších hodnot nabývaly při dávce ozáření 165 kGy při obou zatížení. Stejných hodnot bylo dosaženo také při porovnání neplněných vzorků.



Obr. 44 Srovnání Vickersovy tvrdosti H_{VIT}

Vickersova tvrdost u plněných vzorků dosáhla obdobných výsledků jako v předchozím případě. Nejmenší hodnoty u neozářených vzorků a nejvyšší hodnoty při dávce ozáření 165kGy.



Obr. 45 Srovnání vtiskového tečení C_{IT}

Vtiskové tečení dosáhlo nejnižších hodnot při dávce ozáření 165 kGy o zatížení 0,5 N. Při zatížení 5 N dosáhlo nejnižších hodnot při ozáření 198 kGy. Nejvyšších hodnot při zatížení 0,5 N bylo zjištěno u neozářených vzorků. Při zatížení 5 N poté při dávce ozáření 33 kGy.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo měření mikro-mechanických vlastností u polybutylen-tereftalátu (PBT) neplněného a PBT plněného 30% skelných vláken. Laboratorní měření těchto polymerních materiálů bylo provedeno na nemodifikovaném vzorku a šesti modifikovaných vzorcích, jenž byly vystaveny dávce beta záření o velikosti 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy.

K měření mikro-mechanických vlastností byla využita Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI, na použitém zařízení Micro Combi Tester. Při měření byla zvolena zkušební zatížení o velikosti 0,5 a 5 N. Naměřená data byla následně statisticky vyhodnocena a vynesena do grafů. Sledované hodnoty byly vtisková tvrdost H_{IT} , vtiskový modul pružnosti E_{IT} , Vickersova tvrdost H_{VIT} , Creep C_{IT} , elastická část práce vtisku W_{elast} , plastická část práce vtisku W_{plast} , celková mechanická práce vtisku W_{total} a koeficient zpětné deformace n_{IT} .

Z vyhodnocení vtiskové tvrdosti H_{IT} , vyplynulo, že nejnižších hodnot dosáhly neozářené vzorky u obou materiálů. Nejvyšší hodnotu dosáhl neplněný PBT při ozáření dávkou 132 kGy, PBT plněný skelnými vlákny při dávce 165 kGy. Plněný PBT dosahoval také vyšších hodnot v celém rozsahu aplikovaných dávek záření.

Při porovnání vtiskového modulu pružnosti E_{IT} můžeme sledovat u obou materiálů nejvyšší hodnoty u aplikované dávky ozáření 165 kGy. Nejnižší hodnoty vykazovaly opět neozářené vzorky.

Vickersova tvrdost H_{VIT} zaznamenala nejvyšší hodnoty u neplněného PBT při aplikované dávce 132 kGy, u plněného PBT při ozáření 165 kGy. Naopak nejnižší hodnoty nalezneme opět u neozářených vzorků.

Nejvyšší hodnotu vtiskového tečení C_{IT} dosáhl neplněný PBT při dávce ozáření 165 kGy, plněný PBT na neozářeném vzorku. Nejnižších hodnot dosáhly oba materiály při dávce ozáření 198 kGy.

Elastická W_e , plastická W_p a celková deformační práce W_{total} prokázaly závislost, s rostoucím zatížením nabývaly i hodnoty deformační práce.

Koeficient zpětné deformace vykazoval hodnoty v celém rozsahu větší u neplněného PBT než u PBT plněného skelnými vlákny.

Ze získaných dat vyplývá, že ozáření elektronovým beta zářením zlepšuje mikro-mechanické vlastnosti těchto materiálů. Nejlepších výsledků dosahoval neplněný PBT při

dávce záření 132 kGy, PBT plněný 30 % skelných vláken při dávce ozáření 165 kGy. Je nutno poznamenat, že vyšší dávka ozáření nezaručí vždy zlepšení žádaných mikro-mechanických vlastností polymerního materiálu. Proto je vždy nutno hledat optimální dávku ozáření daného materiálu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2.vydání. Praha: Vysoká škola chemická, 2006. 280 s
- [2] Polymery – V.švorčík.[online].Dostupné z <http://old.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>
- [3] Ing.Luboš Běhálek ,Ph.D – Polymery. Odborné učiliště Svitavy , 2015
- [4] Husárek, J.Makromolekulární látky,syntetické polymery, Inovace profesní přípravy budoucích učitelů chemie. [online]. Dostupné z WWW: http://ucitelchemie.upol.cz/materialy/studijni_texty/vyukova_temata/plasty_text.pdf
- [5] MACEK, Karel a Petr ZUNA. Nauka o materiálu. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1999, 209
- [6] DORAZIL, E.– a KOLEKTIV: Nauka o materiálu I. Vysoké učení technické v Brně, 1976
- [7] SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, VZákladní zkoušky kovových materiálů., Plzeň 2000
- [8] SCHATZ, Miroslav, VONDRÁČEK, Petr. Zkoušení polymeru. 1 vyd. Praha: SNTL -nakladatelství technické literatury, 1979. 264s.
- [9] MĚŘENÍ TVRDOSTI. [online]. Dostupné z WWW: [http:// www.merenitvrlosti.cz](http://www.merenitvrlosti.cz)
- [10] VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. Nakladatelství technické literatury Praha, 1999
- [11] Metrotest – zkoušky tvrdosti[online]. Dostupné z http://www.metrotest.cz/hardness/zkousky_tvrlosti.pdf
- [12] PLUHAŘ J. a kol. Nauka o materiálech. vyd. Praha: SNTL, 1989. 552
- [13] Jhamernik- Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení[online]. Dostupné z <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [14] HLUCHÝ, M.; KOLOUCH, J. Strojírenská technologie 1. [s.l.] : Scientia, 1999.
- [15] METROTEST, s.r.o Kladno. [online]. 1994. Dostupné z www.metrotest.cz/hardness/zkousky_tvrlosti.pdf
- [16] Zedník V.- Zkoušení Kovů, Praha 1957.

- [17] Knoop Hardness- [online]
http://www.efunda.com/units/hardness/convert_hardness.cfm?HD=HK&Cat=Steel
- [18] Doležal P., Pascal B. - Hodnocení mikrotvrlosti struktur materiálů [online]
<http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>
- [19] Zkousky_tvrlosti [online]. 2005 [cit. 2010-02-10]. Dostupný z
http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [20] DUŠEK, J. Tvrlost, mikrotvrlost, nanotvrlost-čisté kovy měřené metodou DSI. Brno, 2008. 165 s. Disertační práce Masarykova univerzita v Brně. Vedoucí disertační práce Prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc.
- [21] Horáček J. - Nauka o materiálu (návody na cvičení), Česká zemědělská univerzita v Praze, 2004, 2.vydání
- [22] Bc. Šťastný P. - Měření mikrotvrlosti modifikovaného polyamidu 11 , Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Vedoucí práce doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [23] Indentation Software manual. CSM Instrument, [online]. <http://www.csm-instruments.com>, Peseux, Switzerland.
- [24] SCHATZ, Miroslav, VONDRÁČEK, Petr. Zkoušení polymeru. 1. vyd. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1979. 264 s
- [25] Ing. Ovsík, M. Ph.D., Disertační práce- Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Vedoucí práce doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [26] Resinex.cz [online] Dostupný z <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pbt.html>
- [27] dowell.com [online] Dostupný z <http://www.dowell.com.hk/whatispbt.htm>
- [28] plasticseurope.com [online] Dostupný z <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/engineering-plastics/pbt.aspx>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

HR	Tvrlost dle Rockwella
HB	Tvrlost dle Brinella
HV	Tvrlost dle Vickerse
HK	Tvrlost dle Knoop
H _{CH}	Tvrlost dle Berkoviče
H _M	Tvrlost dle Martense
F	Zatěžující síla
D	Průměr kuličky
d	Střední průměr vtisku
d _{1,2}	Naměřená úhlopříčka vtisku
h ₃	Hloubka trvalého vtisku
A	Plocha vtisku
l	Délka úhlopříčky
t	Doba zatížení
F _{max}	Maximální zatěžující síla
E	Youngův modul
E _{IT}	Vtiskový modul
E*	Komplexní modul
E _r	Redukovaný modul
E _i	Modul vnikajícího tělesa
v _i	Poissonův poměr vnikajícího tělesa
v _s	Poissonův poměr zkoušeného tělesa
C _{IT}	Vtiskové tečení (creep)
H _{IT}	Vtisková tvrdost

H_{VIT}	Tvrđost dle Vickerse
n_{IT}	Koeficient zpětné relaxace
W_e	Elastická deformační práce
W_p	Plastická deformační práce
W_t	Celková deformační práce
PBT	Polybutylen-tereftalát
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozdělení polymerů.....	11
Obr. 2 Příklad využití termoplastů.....	12
Obr. 3 Příklad využití reaktoplastů.....	12
Obr. 4 Mechanické namáhání plastu a elastomeru.....	13
Obr. 5 Molekulární struktura polymeru.....	14
Obr. 6 Závislost vlastnosti polymerů na tvaru molekul.....	15
Obr. 7 Vtisk Rockwellem.....	17
Obr. 8 Schéma měření dle Rockwella.....	18
Obr. 9 Tvrdoměr typu Rockwell.....	20
Obr. 10 Zkouška Brinell.....	21
Obr. 11 Tvrdoměr typu Brinell.....	22
Obr. 12 Princip Vickersovy metody.....	23
Obr. 13 Schéma deformace vtisku při Vickersově metodě.....	24
Obr. 14 Průběh zkoušeného zatížení.....	25
Obr. 15 Tvrdoměr typu Vickers.....	26
Obr. 16 Tvar vtisku metodou Knoop.....	28
Obr. 17 Geometrie Berkovičova indentoru.....	31
Obr. 18 Hanemannův Mikrotvrdoměr.....	32
Obr. 19 Indentační křivka.....	33
Obr. 20 Schematické znázornění chování materiálu.....	34
Obr.21 Strukturní vzorec PBT.....	39
Obr. 22 Příklady aplikací PBT.....	40
Obr. 23 Micro Combi Tester.....	41
Obr. 24 Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 0,5 N.....	45
Obr. 25 Vtiskový modul E_{IT} při zatížení 0,5 N.....	45
Obr. 26 Vickersova tvrdost H_{VIT} při zatížení 0,5 N.....	46
Obr. 27 Vtiskové tečení C_{IT} při zatížení 0,5 N.....	46
Obr. 28 Deformační práce W při zatížení 0,5 N neplněný PBT.....	47
Obr. 29 Deformační práce W při zatížení 0,5 N PBT plněný.....	48
Obr. 30 Koeficient zpětné deformace při zatížení 0,5 N.....	48
Obr. 31 Vtisková tvrdost H_{IT} při zatížení 5 N.....	50
Obr. 32 Vtiskový modul E_{IT} při zatížení 5 N.....	50

Obr. 33 Vickersova tvrdost H_{VIT} při zatížení 5 N.....	51
Obr. 34 Vtiskové tečení C_{IT} při zatížení 5 N	51
Obr. 35 Deformační práce W při zatížení 5 N – neplněný PBT.....	52
Obr. 36 Deformační práce W při zatížení 5 N – plněný PBT.....	53
Obr. 37 Koeficient zpětné deformace při zatížení 5 N	53
Obr. 38 Porovnání vtiskové tvrdosti H_{IT}	54
Obr. 39 Porovnání vtiskového modulu E_{IT}	54
Obr. 40 Porovnání Vickersovy tvrdosti H_{VIT}	55
Obr. 41 Porovnání vtiskového tečení C_{IT}	55
Obr. 42 Srovnání vtiskové tvrdosti H_{IT}	56
Obr. 43 Srovnání vtiskového modulu E_{IT}	56
Obr. 44 Srovnání Vickersovy tvrdosti H_{VIT}	57
Obr. 45 Srovnání vtiskového tečení C_{IT}	57

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Velikost zkušebních zatížení při měření dle Knoopu	28
Tabulka 2. Rozdělení zkoušek dle Vickerse	29
Tabulka 3. Naměřené hodnoty pro PBT neplněný (0,5N)	44
Tabulka 4. Naměřené hodnoty pro PBT plněný 35% skelných vláken (0,5N)	44
Tabulka 5. Naměřené hodnoty pro PBT neplněný (5N)	49
Tabulka 6. Naměřené hodnoty pro PBT plněný 35% skelných vláken (5N)	49

SEZNAM PŘÍLOH

PI CD ROM

PŘÍLOHA P I: CD ROM