

Mikrotvrdost modifikovaného PA66 pomocí beta záření

Tomáš Žalek

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš ŽALEK**
Osobní číslo: **T10339**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mikrotvrdost modifikovaného PA66 pomocí beta záření**

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

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

8. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

17. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu 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, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 14.5.2013

.....
Žalík Tomáš

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 dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je zjistit, jak se mění mikrotvrdot modifikovaného PA66 při dávkách ozáření 0, 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy. V teoretické části se zabývám jednotlivými zkouškami tvrdosti a to dle Brinella, Vickerse, Rockwella, Knoop a Berkovice.

V praktické části práce bylo provedeno měření mikrotvrdoti PA66 a následné zpracování výsledků do tabulek a grafů.

Klíčová slova: Tvrdost, mikrotvrdot, Vickers, indentor, materiál PA66, síťování, ozáření

ABSTRACT

The aim of this bachelor work is find out, how it changes Micro-hardness modified of PA66 at doses of radiation 0, 33, 66, 99, 132, 165 and 198 kGy. In the theoretic part I occupy of individual tests Hardness and according to Brinell, Vickers, Rockwell, Knoop and Berkovic.

The practical part was performed measurement Micro-hardness of PA66 and processing results to tables and diagrams.

Keywords: Hardness, Micro-hardness , Vickers, indentor, Material PA66, crosslinkig, irradiation

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Ovsíkovi za odborné vedení, cenné rady, obětavý přístup a hlavně za čas, který věnoval mojí bakalářské práci.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TVRDOST	12
1.1 MIKROTVRDOST	12
1.2 ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK TVRDOSTI.....	13
1.2.1 Podle rychlosti působení zatěžující síly	13
1.2.2 Podle principu zkoušek	13
1.3 ZKUŠEBNÍ TĚLESO	14
1.4 IDENTAČNÍ KŘIVKA	14
2 ZKOUŠKY TVRDOSTI	16
2.1 ZKOUŠKA TVRDOSTI DLE BRINELLA	16
2.1.1 Princip zkoušky.....	16
2.1.2 Označení tvrdosti	17
2.1.3 Vnikající tělesa a zkušební zařízení	17
2.1.4 Provedení zkoušky.....	18
2.1.5 Zápis hodnoty tvrdosti	19
2.2 ZKOUŠKA TVRDOSTI DLE ROCKWELLA	19
2.2.1 Princip zkoušky.....	19
2.2.2 Vnikající tělesa a zařízení	20
2.2.3 Provedení zkoušky.....	21
2.2.4 Zápis hodnoty tvrdosti	22
2.3 ZKOUŠKA TVRDOSTI DLE VICKERSE	22
2.3.1 Princip zkoušky.....	22
2.3.2 Vnikající tělesa a zařízení	24
2.3.3 Provedení zkoušky.....	24
2.3.4 Zápis hodnoty tvrdosti	25
2.4 ZKOUŠKA TVRDOSTI DLE KNOOP.....	25
2.4.1 Princip zkoušky.....	25
2.4.2 Označení tvrdosti.....	26
2.5 ZKOUŠKA TVRDOSTI DLE BERKOVIC	26
2.5.1 Princip zkoušky.....	26
3 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ	28
3.1 SÍŤOVÁNÍ POMOCÍ SILANŮ	28
3.2 SÍŤOVÁNÍ POMOCÍ PEROXIDŮ.....	28
3.3 RADIAČNÍ ZÁŘENÍ	29
3.4 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ.....	29
3.4.1 Záření beta	29
3.4.2 Záření gama	30
3.4.3 Rozdíly mezi zářeními beta a gama.....	30

3.5	RADIAČNĚ SÍŤOVANÉ POLYMERY	32
3.5.1	Zlepšení vlastností po síťování.....	32
4	POLYAMIDY.....	34
4.1	VLASTNOSTI POLYAMIDŮ	34
4.1.1	Vlastnosti PA 66.....	34
4.1.2	Oblast použití PA 66.....	35
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	37
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	38
5.1	POLYAMID 66.....	38
5.1.1	Výrobní parametry Polyamidu 66	39
5.1.2	Parametry vstřikování Polyamidu 66	39
5.2	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A VYHODNOCENÍ MIKROTVRDOSTI	40
5.3	POUŽITÉ MATEMATICKÉ VZORCE	40
5.4	VTISKOVÁ TVRDOST H_{IT}	40
5.5	VTISKOVÝ MODUL E_{IT}	41
5.6	VTISKOVÉ TEČENÍ C_{IT}	41
5.7	PLASTICKÁ A PRUŽNÁ ČÁST PRÁCE VNIKACÍHO PROCESU.....	42
6	ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI	44
6.1	ZPRACOVANÉ VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	44
6.1.1	Vickersův indentor.....	44
6.1.2	Grafické znázornění výsledků.....	45
6.1.3	Naměřené data pro zatížení 1 N	49
6.1.4	Naměřené hodnoty pro zatížení 5 N	54
7	POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	60
	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM TABULEK	73
	SEZNAM PŘÍLOH	74

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce bylo měření mikrotvrdomosti vybraného typu polymeru. Polymery jsou v dnešní době velice využívané, ať už se jedná o sportovní potřeby, výrobky pro domácnost, elektroniku nebo automobilový průmysl. Mikrotvrdomost je často využívaná mechanická vlastnost, kterou potřebujeme znát, abychom mohli dané součástky aplikovat v různých průmyslových odvětvích. Mikrotvrdomost je odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Zkoušky mikrotvrdomosti jsou výhodné z toho hlediska, že můžeme určit tvrdost jednotlivých struktur materiálu polymeru. Měření se provádí za přesně stanovených podmínek. Díky naměřeným hodnotám mikrotvrdomosti můžeme zjistit i další mechanické vlastnosti, např. pevnost v tahu.

V mé bakalářské práci se provádí měření mikrotvrdomosti pomocí Vickersova indentoru na přístroji Micro-Combi-Tester, při přesně stanovených podmínkách a rozměrech součástí.

V teoretické části práce se zabývám rozdělením jednotlivých metod měření tvrdosti. Následně byly vybrány nejznámější zkoušky – dle Brinella, Vickerse, Rockwella, Knoop a Berkovice. U těchto metod měření byl popsán postup měření, zkušební vzorky a zatížení a následné zpracování výsledků. Dále jsem se zabýval v dnešní době stále více se prosazujícím síťováním polymerů.

V praktické části byl vybrán jako zkušební materiál Polyamid 66 modifikovaný různými dávkami záření. Zvolené zatížení bylo 1 a 5 N. Naměřené výsledky byly vyhodnoceny a porovnány v grafech.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TVRDOST

Tvrlost patří k důležitým a často používaným vlastnostem polymerních materiálů. Oproti kovům je specifickým polymerů, že se při zatížení zkušebním tělesem deformují v celém objemu. Jsou houževnaté a například pryž je i pružná. Zkoušky tvrdosti proto u polymerů představují odpor celého objemu tělesa proti vnikání zkušebního tělíska. Pro jednotlivé druhy materiálů se používají různé metody jejího měření. [1]

1.1 Mikrotvrlost

Tyto zkoušky jsou používané na měření tvrdosti velmi malých předmětů, tenkých vrstev, případně v metalografii na měření tvrdosti jednotlivých strukturních složek. Měření tvrdosti je realizované vtlačováním diamantového tělesa tvaru Vickersova nebo Knoopova jehlanu do povrchu měřeného tělesa silami v rozsahu od 1g (0,09807 N) do 1000g (9,8707 N). Tělíska tvaru čtyřbokého jehlanu je do zkušebního tělesa tlačeno pod určitým zatížením, které působí v kolmém směru stanovenou dobu. Po odlehčení se změří úhlopříčka vtisku. Běžné zkoušky (makro) tvrdosti podle Vickerse jsou dělané při zatížení mezi 10 a 1200N. První použití síly menší než 10N se datuje do roku 1932, kdy byly tyto zkoušky dělané v National Physical Laboratory ve Velké Británii. [2]

Při měření mikrotvrlosti aplikovaná síla klesá – zmenšuje se velikost vrypu a tím klesá přesnost měření.

Při měření mikrotvrlosti jsou vtisky malé, použití této metody je vhodné pro:

- malé a tenké vzorky
- měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkoušeného vzorku
- měření mikrotvrlosti strukturních složek
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků
- hodnocení svarových spojů
- měření křehkých materiálů [2]

1.2 Rozdělení zkoušek tvrdosti

Zkoušky používané na měření tvrdosti dělíme na :

1.) podle principu rozeznáváme zkoušky - vrypové, vnikací, odrazové
2.) podle rychlosti působení zatěžující síly dělíme zkoušky tvrdosti na
 - a) **statické:** Brinell, Vickers, Knoop, Rockwell, IR HD a Shore A, D
 - b) **dynamické:** Poldi kladívko, Baumannovo kladívko, Shoreho skleroskop

Dále podle účelu rozeznáváme zkoušky makro i mikrotvrdosti. [2]

1.2.1 Podle rychlosti působení zatěžující síly

Statické

Zatěžující síla působí staticky ve směru kolmém ke zkoušenému povrchu. Výsledky měření jsou velmi přesné, využívá se v laboratorních přístrojích. [3]

Dynamické

Zatěžující síla působí nárazově ve směru kolmém ke zkoušenému povrchu. Výhodou těchto zkoušek jsou menší rozměry přístrojů, což umožňuje snadnou přepravu ke zkoušenému předmětu a měření tvrdosti za provozních podmínek. Přesnost je nižší. [3]

1.2.2 Podle principu zkoušek

Vnikací metody

Jedná se o nejpoužívanější metody. Jsou založeny na vtlačování kuličky, kuželu, jehlanu nebo jiného definovaného tělesa z kalené oceli, tvrdého kovu nebo diamantu do zkoušeného materiálu. Měří se velikost vytvořeného vtisku (jeho průměr, hloubka nebo úhlopříčka). [3]

Vrypové metody

Při těchto zkouškách se do vyleštěného povrchu zkoušeného materiálu rýpe diamantovým tělískem určitého definovaného tvaru zatíženým závažím. Hodnota tvrdosti se určí z šířky vrypu – Martensova metoda. Lze také využít Mohseovy stupnice tvrdosti, ve které je seřa-

zeno 10 nerostů od nejměkčího mastku až po nejtvrďší diamant. Tyto zkoušky nejsou normalizované a v praxi se téměř nepoužívají. [3]

Odrazové metody

Princip těchto metod je založen na odrazu padajícího tělíska určitého tvaru a hmotnosti od zkoušeného vzorku. Část kinetické energie tělíska je vynaložena na elastickou deformaci povrchu materiálu a zbytek energie se spotřebuje na odražení tělíska zpět do určité výšky. Tvrdost se určí z výšky odrazu (Shoreho skleroskop). Používá se při zkoušení velmi tvrdých materiálů. [3]

1.3 Zkušební těleso

Zkoušku je nutno provést v oblasti zkoušeného povrchu, která umožní stanovení křivky zatížení/hloubka vtisku v příslušném rozmezí vtisku s požadovanou nejistotou. Na kontaktní ploše se nesmí vyskytovat kapaliny nebo maziva s výjimkou těch, které jsou nezbytné k provedení zkoušky. Tyto musí být podrobně popsány ve zkušebním protokolu. Musí se dbát na to, aby se na kontaktní ploše nevyskytovaly nežádoucí látky (např. prachové částice). Zkušební povrchy musí být kolmé ke směru zkušebního zařízení. Doporučuje se, aby do výpočtu nejistoty byl zahrnut sklon. Zpravidla je sklon zkušebního povrchu vždy menší než 1° . [4]

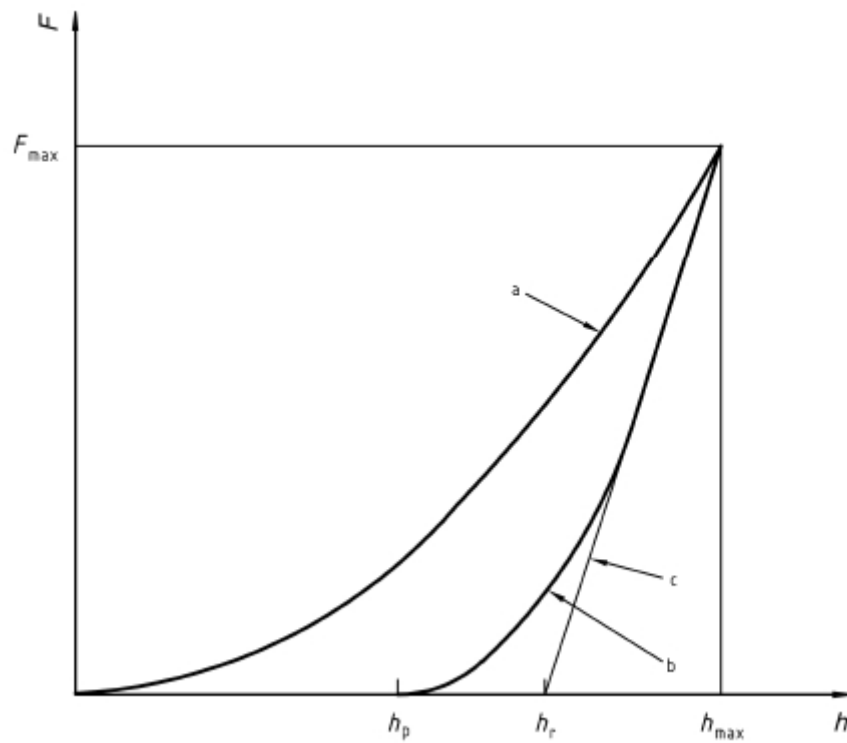
V mikro a nano rozsahu se musí, v důsledku malých hloubek vtisku, přijmout zvláštní opatření při přípravě zkušebního tělesa. Je nutno použít leštící proces, který je vhodný pro speciální materiály. [4]

1.4 Identifikační křivka

Stanovení tvrdosti a materiálových vlastností je umožněno nepřetržitým monitorováním zatížení a hloubky vtisku. Použité tvary a materiály vnikajícího tělesa, které je z tvrdšího materiálu než materiál zkoušený mohou být následující:

- Diamantové vnikající těleso tvaru čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem mezi protilehlými stranami $\alpha=136^\circ$ (jehlan podle Vickerse)

- Diamantový jehlan s trojúhelníkovou základnou (jehlan podle Berkoviche)
- Tvrdokovová kulička (ke stanovení elastického chování materiálů)
- Diamantové sférické vnikající těleso [4]



a-zatěžování, b-odlehčování, c-tečna ke křivce b v F_{\max}

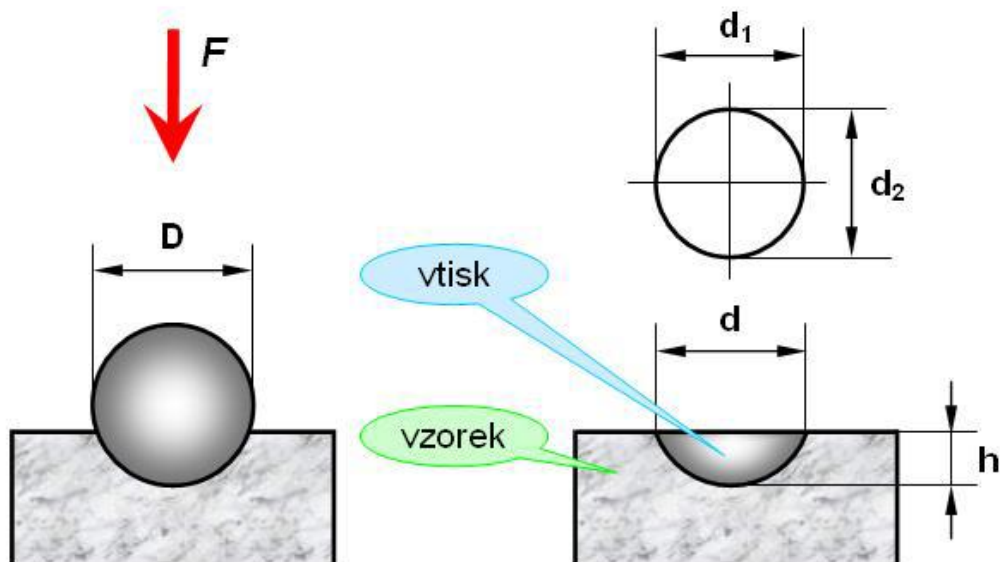
Obr. 1. Identifikační křivka. [4]

2 ZKOUŠKY TVRDOSTI

2.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella

2.1.1 Princip zkoušky

Podstata metody spočívá v zatlačení kalené ocelové kuličky (metoda HBS) nebo kuličky z tvrdokovu (metody HBW) o průměru D do povrchu zkoušeného materiálu zatěžující silou F . Po odlehčení se určí aritmetický průměr vtisku d . Podle zatěžující síly, indentoru a vtisku d se z tabulek určí tvrdost podle Brinella. [5]



Obr. 2. Obecné schéma Brinellovy zkoušky. [5]

Tvrdotost podle Brinella je definována podle následujícího vztahu:

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h} \quad [MPa] \quad [1]$$

Kde: F ...síla, kterou je kulička vtlačována do zkušební tělesa

S ...plocha důlku vytlačeného kuličkou [mm^2]

h ...hloubka důlku vytlačeného kuličkou [mm]

D ...průměr ocelové kuličky [mm]

Pokud měříme průměr okraje důlku d , pak platí vztah:

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} \quad [\text{mm}] \quad [5]$$

Pro výpočet tvrdosti použijeme vztah:

$$HB = 0,102 \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [\text{MPa}] \quad [5]$$

Kde: d ...kulová výseč kuličky vniklé do zkoušeného materiálu [mm]

h ...hloubka vtisku [mm]

D ...průměr zkušební kuličky [mm] [5]

2.1.2 Označení tvrdosti

Skládá se 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 šikmou zlomkovou čarou (např. HB 5/7500/30 = 320). Pro nejběžnější podmínky, tj. HB 10/30000/10, používáme jen označení HB (např. HB=210). [8]

2.1.3 Vnikající tělesa a zkušební zařízení

Vnikající těleso je kulička, která musí být vyrobena z leštěné tvrzené oceli. Průměr kuličky spolu se zkušebním zatížením a dobou odečítání je obsaženo v Tab. 1.

Tab. 1. Průměr kuličky, zkušební zatížení a doba odečítání. [9]

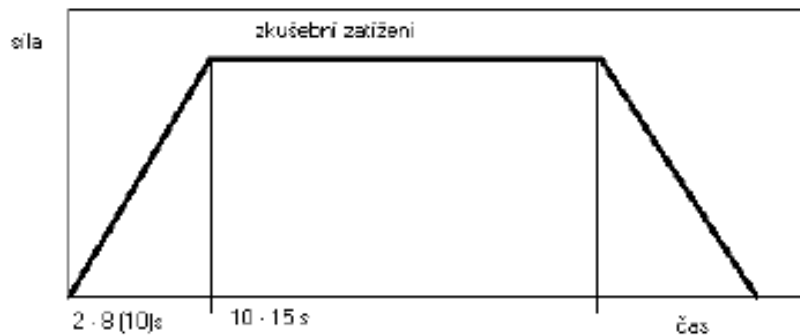
Symbol	Průměr kuličky [mm]	Celkové zatížení [N]	Doba odečítání [s]
HB	5 ± 0,05	49	30
HB		132	
HB		358	
HB		961	

Zkušební zatížení F se zvolí z hodnot s dovolenou tolerancí ± 1%:

Odečítá se: hloubka důlku h výškovým indikátorem při zatížení, které je zabudováno přímo na zkušebním zařízení a průměr důlku d mikroskopem po odlehčení. [9]

2.1.4 Provedení zkoušky

1. Zkouška se provádí obvykle při teplotě 10 až 35°C, v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$.
2. Při zkoušce musí být použito zkušební zatížení odpovídající zkoušenému materiálu a velikosti kuličky.
3. Zkušební zatížení musí být vybráno tak, aby průměr vtisku d byl v rozmezí hodnot od $0,24 D$ do $0,6 D$.
4. Vzorek musí být při zkoušce položen na tuhé podložce. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek, je důležité, aby vzorek ležel na podložce tak, aby se při zkoušce nepohnul.
5. Vnikající těleso se zatlačuje do povrchu vzorku zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázů, chvění a přesahu až do dané hodnoty. Doba od začátku zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2 s a delší než 8s. Doba působení zkušební síly je v rozmezí 10 až 15s. Pro některé materiály mohou být použity delší časy, ty však musí být dodržovány s tolerancí $\pm 2\text{s}$.
6. Během zkoušky musí být zkušební zařízení chráněno proti rázům a chvění, které mohou ovlivnit výsledek zkoušky.
7. Vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a minimálně 3 násobek průměru vtisku při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být nejméně 4 násobek průměru vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a 6 násobek průměru vtisku při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin.
8. Po zkoušce se změří průměr každého vtisku ve dvou na sebe kolmých směrech. Pro stanovení tvrdosti se bere průměrná hodnota velikosti vtisku. [10]



Obr. 3. Průběh zkušebního zatížení – metoda Brinell. [10]

2.1.5 Zápis hodnoty tvrdosti

Hodnota tvrdosti	Symbol zkoušky	Rozměr vnikacího tělesa	Velikost zkušebního zatížení	Doba působení zkušebního zatížení
$\frac{ }{XXX}$	$\frac{ }{HB}$	$\frac{ }{XX}$	$\frac{ }{XXX}$	$\frac{ }{XX}$

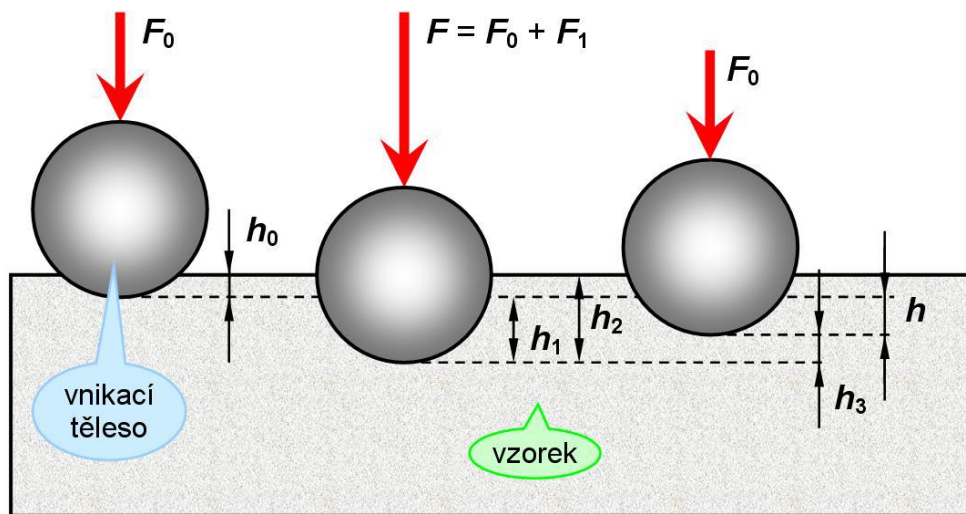
Obr. 4. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Brinella. [11]

2.2 Zkouška tvrdosti dle Rockwella

2.2.1 Princip zkoušky

Princip této metody spočívá v postupném vlačování vnikajícího tělesa dvěma stupni zatížení do povrchu zkušebního tělesa a změření trvalé hloubky vtisku h . Vnikajícím tělesem je ocelová kulička o definovaném průměru. Celkové zkušební zatížení F se skládá z předběžného zatížení F_0 a přídavného zatížení F_1 . [6]

Tvrdot se měří na základě hloubky vniknutí malé kuličky nebo diamantového kužele při zatížení definovanou silou. Tato metoda nemá přepočtové tabulky, hodnota tvrdosti se odečítá na stupnici hloubkoměru, který je součástí tvrdoměru. [13]



Obr. 5. Obecné schéma Rockwellovy zkoušky. [6]

Každý dílek Rockwellovy stupnice tvrdosti představuje svislý posun měřicí kuličky o 0,002 mm. Maximální hloubka vtláčení indentoru je 0,2 mm. Tvrdost podle Rockwella se vypočítá podle následujícího vzorce, tento vzorec platí pouze pro stupnice *M*, *L*, *R* a *E*.

Hodnota tvrdosti dle Rockwella je v praxi odvozena z následujícího vztahu:

$$HR = 130 - e$$

kde: HR... hodnota tvrdosti dle Rockwella,

e... hloubka vtláčení po odstranění přídavného zatížení; v jednotkách 0,002 mm. [8]

Pokud je nám známa trvalá hloubka vtláčení, vypočítáme hloubku vtláčení *e* podle vzorce:

$$e = \frac{h}{0,002}$$

Kde: *h*...trvalá hloubka vtláčení [mm]

[10]

2.2.2 Vnikající tělesa a zařízení

Pro měření tvrdosti dle Rockwella se používá leštěná tvrzená ocelová kulička.

Tab. 2. Zatížení a průměry kuliček u metody Rockwell. [12]

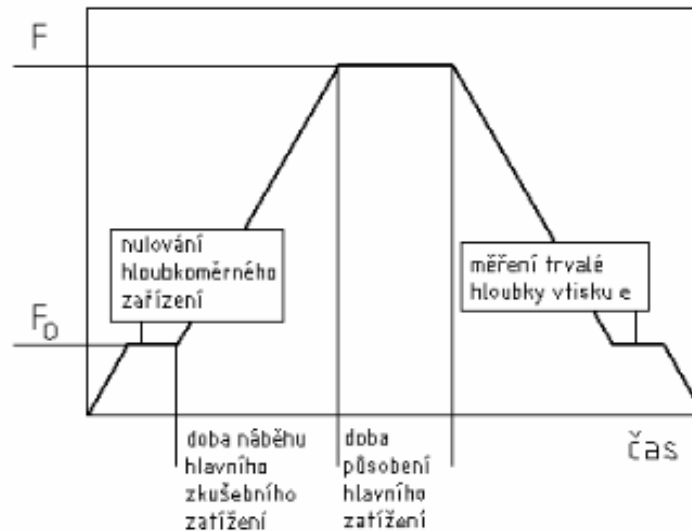
Stupnice tvrdosti dle Rockwella	Předběžné zatížení [N]	Přídavné zatížení [N]	Průměr měřicí kuličky [mm]
R	98,07	588,4	12,7 ± 0,015
L	98,07	588,4	6,35 ± 0,015
M	98,07	980,7	6,35 ± 0,015
E	98,07	980,7	3,175 ± 0,015

Stupnice tvrdosti E je pouze pro kalibraci

2.2.3 Provedení zkoušky

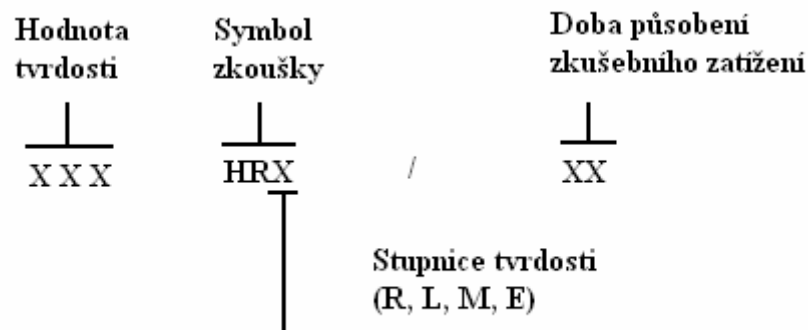
1. Zkouška se provádí obvykle při teplotě 10 až 35°C, v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$.
2. Zkušební těleso musí být umístěno na tuhé podložce a podepřeno takovým způsobem, aby zkoušený povrch byl v rovině kolmé k ose vnikacího tělesa a směru zatížení. Rovněž musí být vyloučeno posunutí zkušební tělesa.
3. Vnikací těleso se přivede do styku se zkoušeným povrchem a zatíží se předběžným zatížením F0 bez rázů, chvění a kmitání. Doba působení předběžného zatížení F0 nesmí překročit 3 s.
4. Měřicí zařízení se nastaví do počáteční polohy a bez rázů, chvění a kmitání se zvýší zatížení z F0 na F v čase od 1 do 8 s. (Vnikací těleso se zatlačuje do povrchu vzorku zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu až na hodnotu předzatížení. Po dosažení předzatížení se nuluje měřicí zařízení hloubky vtisku).
5. Doba působení celkového zatížení musí být 4 ± 2 s. Po odlehčení přídavného zatížení F1, kdy působí předběžné zatížení F0, a po krátké době stabilizace, se musí provést konečné čtení.
6. Hodnota tvrdosti podle Rockwella se stanoví z trvalé hloubky vtisku h užitím vzorců z tabulky, obvykle se však čte přímo na měřicím zařízení.
7. Zkušební zařízení musí být chráněno před nárazy a chvěním během celé zkoušky.
8. Vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být alespoň 4 násobek

průměru vtisku (ale nejméně 2 mm). Vzdálenost středu každého vtisku od okraje tělesa musí být alespoň 2,5 násobek průměru vtisku (ale nejméně 1 mm). [10]



Obr. 6. Průběh zatížení u zkoušky podle Rockwella. [10]

2.2.4 Zápis hodnoty tvrdosti



Obr. 7. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Rockwella. [11]

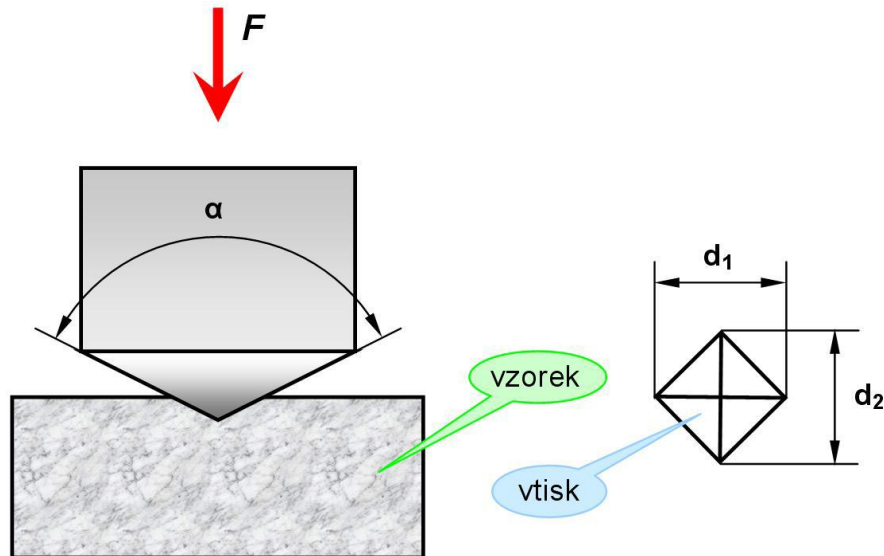
2.3 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

2.3.1 Princip zkoušky

Metoda dle Vickerse je obdobná jako zkouška dle Brinella. U této zkoušky se používá pravidelný čtyřboký jehlan.

Zkouška tvrdosti podle Vickerse spočívá ve vtažení diamantového jehlanu do zkušebního

vzorku určitým zkušebním zatížením F po stanovenou dobu a změří se úhlopříčka vtisku (zjistíme aritmetický průměr délek obou naměřených úhlopříček d_1 a d_2), která zůstane po odlehčení zatížení. [11]



Obr. 8. Obecné schéma Vickersovy zkoušky. [7]

Tvrдость dle Vickerse se počítá pomocí vztahu:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{1,8544 \cdot F}{d_{12}} \quad [\text{MPa}] \quad [8]$$

Obsah plochy vtisku vypočítáme:

$$S = \frac{F}{S} = \frac{d_{12}}{2 \cdot \sin \frac{136}{2}} \quad [\text{mm}^2] \quad [11]$$

Kde: F ... zatěžující síla [N]

d_{12} ... aritmetický průměr úhlopříček vtisku [mm] [11]

S ... plocha vtisku [mm²]

Tab. 3. Metoda dle Vickerse se podle zatížení dělí na tři skupiny. [8]

Označení	Hodnota tvrdosti HV	Zkušební zatížení [N]
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	$\geq HV5$	$F \leq 49.03$
Zkouška tvrdosti podle Vickerse s nízkým zatížením	HV 0.2 - HV 5	$1.961 \leq F \leq 49.03$
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	$HV 0.01 < HV 0.2$	$0.09807 \leq F \leq 1.961$

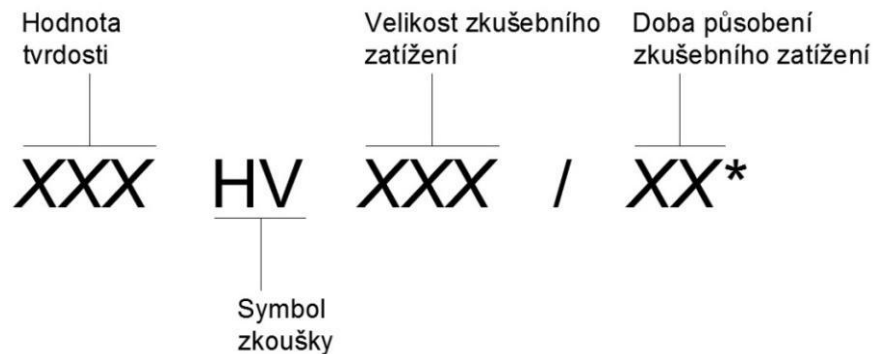
2.3.2 Vnikající tělesa a zařízení

Vnikajícím tělesem je u této metody čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Zkušební zatížení je voleno podle skupiny měření, a to na základě tabulky. Zkušební zatížení by mělo působit od 10 do 15 s, pokud je možné použít u některého materiálu delší dobu vnikání, je nutné tuto dobu uvést do zápisu naměřené hodnoty tvrdosti. [13]

2.3.3 Provedení zkoušky

1. Zkouška se provádí obvykle při teplotě 10 až 35°C , v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$.
2. Po celou dobu zkoušky musí být zkušební přístroj chráněn proti rázů a chvění.
3. Zkušební zatížení se používají dle tabulky 3.
4. Vzorek musí být položen na tvrdé podložce a je důležité, aby se během zkoušky nepohnul. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek.
5. Vnikající těleso se vtlačuje do zkušební vzorku zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázu a bez chvění. Doba, po kterou zatěžujeme zkušební sílu nesmí být menší než 2 s a delší než 8 s.
6. Při zkouškách, kde se používá nízké zatížení nesmí celková doba překročit 10 s. Doba působení zatěžující síly se musí pohybovat od 10 s do 15 s. [7]

2.3.4 Zápis hodnoty tvrdosti



* - zapisuje se tehdy, je-li různá od stanovené doby (10 až 15 s) [11]

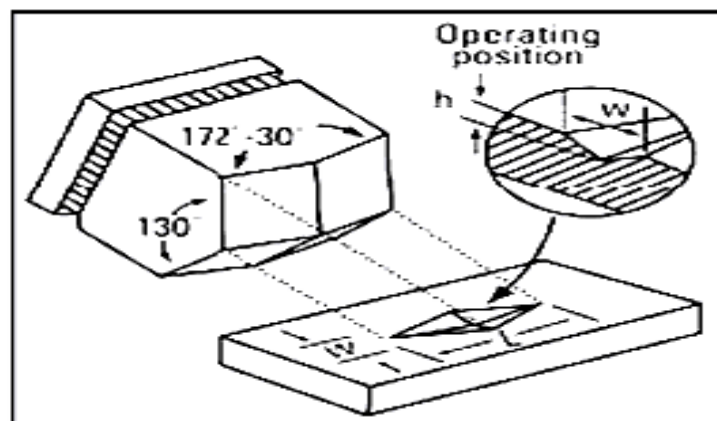
Obr. 9. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Vickerse. [11]

2.4 Zkouška tvrdosti dle Knoop

2.4.1 Princip zkoušky

Metoda je založena na vtlačování diamantového vnikajícího tělesa ve tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholovými úhly $172,5^\circ$ a 130° do zkoušeného materiálu definovanou silou. Vtisk má tvar protáhlého kosočtverce a na rozdíl od metody Vickers se měří pouze delší úhlopříčka. [10]

Diamantové vnikající těleso ve tvaru jehlanu s kosočtverečnou základnou s předepsanými úhly protilehlých stran vtlačováno do povrchu zkušebního tělesa. Poté je měřena delší úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního zatížení F . [2]



Obr. 10. Průběh zatížení u zkoušky podle Knoop. [2]

Tvrдость dle Knoopu vypočítáme dle vztahu:

$$HK = 0,102 \frac{F}{l^2 \cdot c} = 0,102 \frac{F}{0,07028 \cdot l^2} = 1,451 \frac{F}{l^2}$$

Kde: F...zatěžující síla [N]

l ... délka úhlopříčky [mm]

[2]

2.4.2 Označení tvrdosti

Tvrдость podle Knoopu se označujeme symbolem HK za nímž následuje číslice charakterizující velikost zkušebního zatížení a doba působení zkušebního zatížení v sekundách zapisuje se tehdy je-li různá od stanovené doby (10 až 15 s).

Př.1: 640 HV 0,1 = tvrdost dle Knoopu 640 stanovená při zkušebním zatížení 0,9807 N působícím po dobu od 10 do 15 s. [2]

2.5 Zkouška tvrdosti dle Berkovic

2.5.1 Princip zkoušky

Podstata a průběh této zkoušky je totožný s Vickersovou zkouškou. Rozdíl je však ve vznikajícím tělese. Výroba pravidelného čtyřbokého jehlanu pro Vickersovu zkoušku je poměrně náročná, především v dodržení sbíhavosti hran. Indentor pro Berkovichovu zkoušku představuje nepravidelný trojboký jehlan z diamantu. Původní Berkovichův indentor měl úhel mezi výškou l a bočními stěnami 65,03°. Dnes se též užívá modifikovaného Berkovichova indentoru, kde má tento úhel hodnotu 65,27°. [14]

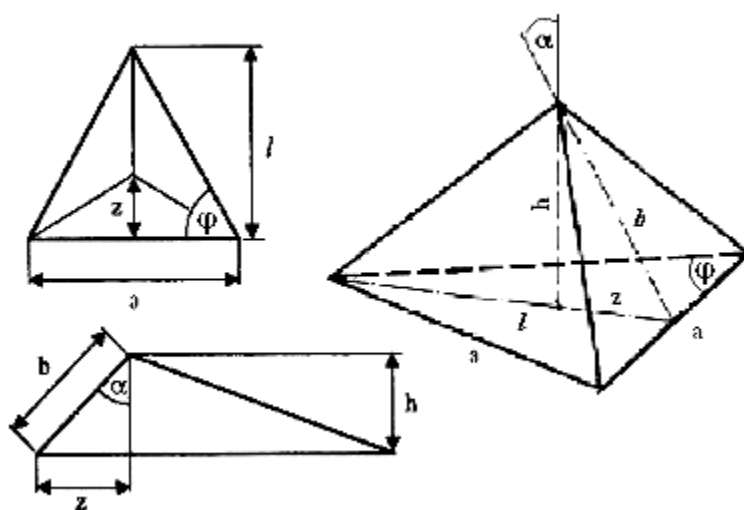
Tvrдость dle Berkovice vypočítáme dle vztahu:

$$H_{ch} = 1570 \frac{W}{l^2}$$

kde: H_{ch} ...mikrotvrđosti podle Berkoviche

W....zkušební zatížení [N]

l....výška trojúhelníku změřená na vtisku [mm] [14]



Obr. 11. Berkovichův indentor. [14]

3 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ

Pod pojmem síťované polymery rozumíme makromolekulární látky, řetězce jejichž makromolekuly jsou vzájemně spojeny chemickými vazbami tak, že vytvářejí trojrozměrnou prostorovou síť. Vznikají buď sesíťováním lineárního nebo rozvětveného polymeru, nebo vzájemnou reakcí dvou nebo více monomerů o formální funkčnosti (tj. schopnosti vytvořit chemickou vazbu) větší než 2. Síťování lineárních polymerů je charakteristické pro kaučuky, kde pak mluvíme o vulkanizaci - procesu poskytujícím pryž. V poslední době se síťování průmyslově uplatňuje i u jiných lineárních polymerů, např. polyethylenu, polypropylenu a polyvinylchloridu, kterým tento proces propůjčuje některé výhodné vlastnosti, zejména tvarovou stálost za zvýšených teplot a zlepšení fyzikálně - mechanických vlastností. Lineární polymer obsahující v řetězci reaktivní místa je schopen reagovat sesíťovacím činidlem za vzniku chemických příčných vazeb. Příčná vazba spojuje strukturní jednotky různých řetězců. [15]

Molekuly (atomy) síťovacího činidla se v některých případech stávají součástí příčné vazby; např. při vulkanizaci kaučuku sírou. V jiných případech síťovací činidlo pouze přinutí reaktivní místa strukturních jednotek ke vzájemnému spojení, aniž by se molekula síťovacího činidla stala součástí příčné vazby. Tak je tomu např. při síťování účinkem peroxidů, záření apod. [15]

3.1 Síťování pomocí silanů

Na vytvoření primárního radikálu, na který se poté naroubují molekuly silanu, se používá peroxid. Vytvoří se Si-O-Si můstky. Pro optimální rychlost reakce se využívá zvýšené teploty a také katalyzátoru. Výhoda síťování silany je ta, že je zde větší rozsah teplot než u síťování peroxidového. Při reakci vznikají vedlejší produkty (voda a methanol). [16]

3.2 Síťování pomocí peroxidů

Při síťování pomocí peroxidu (dibenzonylperoxid, butyl-peroxid) se obvykle používají vyšší teploty (polymer se při ní taví). V prvním kroku se pomocí tepla rozloží peroxid (ROOR) na volné radikály RO, jenž dále reagují polymerním řetězcem. Při této rekombinaci polymerních radikálů dochází ke spojení řetězce přes C-C vazbu. Nevýhodou síťování je jeho nízká účinnost (vedlejší reakce peroxidu a volných radikálů) a také nutnost použít velké množství

poměrně drahých peroxidů. Míchání směsi polymeru s peroxidy a stabilizátory ve speciálním zařízení (u PE Engelův proces). [16]

3.3 Radiační záření

U tohoto síťování je základní předpoklad, že materiál při působení radiačního záření převážně síťuje a nedegraduje. Síťovaný materiál nemusí obsahovat chemické přísady (síťovací činidlo). Hlavním předpokladem je přítomnost tří a více funkčních monomerů. Interakcí záření s polymerem vznikají polymerní radikály a ty pomocí rekombinace v řetězci vytvoří síť spojením dvou radikálů mezi sousedními řetězci. Tato metoda se provádí již na hotovém výrobku (kabelu) bez potřeby zvýšení teploty při procesu. Nevýhodou je velmi vysoká investice za pořízení urychlovače. [16]

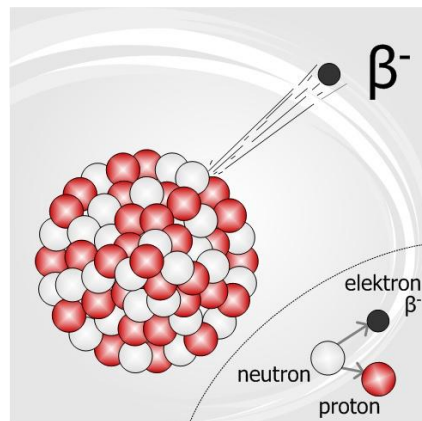
3.4 Ionizační záření

Záření neboli radiace jsou procesy, při kterých dochází v prostoru k přenosu energie. Ionizující záření je takové, jehož kvanta mají tak vysokou energii, že jsou schopna vyřadit elektrony z atomového obalu. Díky tomu se látka ionizuje. Z elektricky neutrálních atomů jsou kladné a záporné ionty.

3.4.1 Záření beta

Beta částice mají stejnou hmotnost jako elektrony, ale mohou být buď negativně, nebo pozitivně nabitě. Díky svým malým rozměrům a náboji proniknou snadněji materiálem než alfa částice, ale jsou snadněji odchýlitelné. Jejich vysoká rychlost, obvykle blízká rychlosti světla, znamená, že jsou lehce ionizující. [17]

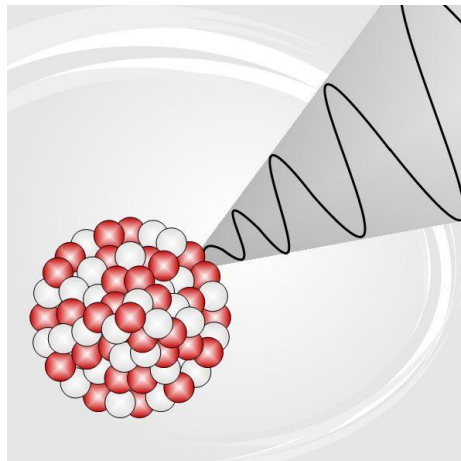
Beta záření může pronikat materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou. K jejich zastavení stačí vrstva vzduchu silná 1 m nebo kovu o šířce 1 mm. Jednomu typu přeměny beta podléhá bismut ^{212}Bi . Při ní se v jádře atomu přemění neutron na proton, elektron a antineutrino. Proton zůstane v jádře a elektron s antineutrinem jádro opustí. Pohybující se elektron se stane beta zářením. Nové jádro má o jeden proton více. Beta rozpadem bismutu pak vzniká polonium ^{212}Po . [18]



Obr. 12. Záření beta. [18]

3.4.2 Záření gama

Záření gama je vysoce energetické elektromagnetické záření vznikající při radioaktivních a jiných jaderných dějích. Řadíme ho k záření s krátkou vlnovou délkou, které vzniká v jádrech některých radioaktivních prvků např. cesium a kobalt. Je definováno jako záření o energii fotonů nad 10keV. Tyto druhy záření se rozlišují dle svého zdroje, přičemž se záření nijak fyzikálně neliší. Do materiálu líp proniká záření gama než beta, ale zároveň je méně ionizující. [18]

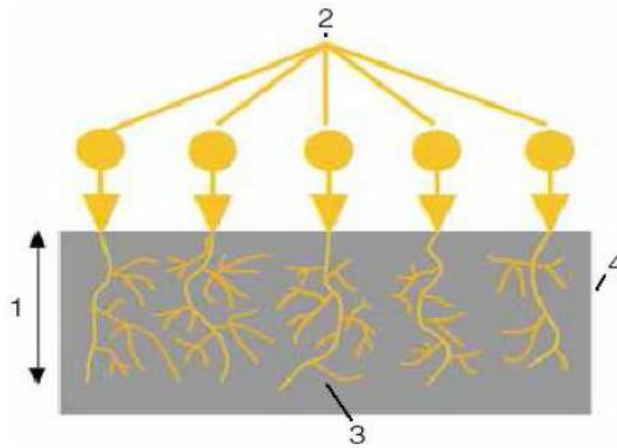


Obr. 13. Záření gama. [18]

3.4.3 Rozdíly mezi zářením beta a gama

Největší rozdíl mezi zářením beta a gama spočívá v hloubce pronikání materiálem a intenzitě ozáření. [19]

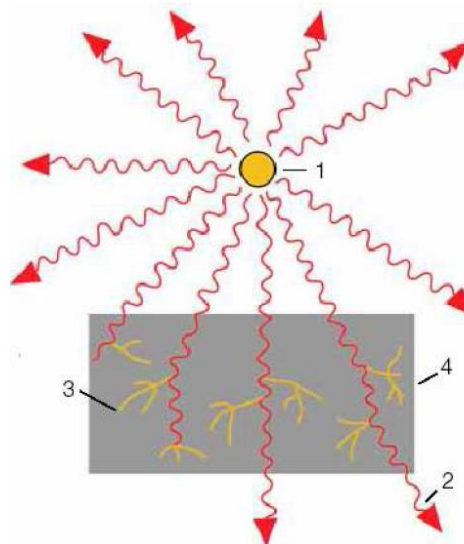
Záření beta má omezenou hloubku pronikání, ale vysokou intenzitu ozáření. Pronikáním elektronů do materiálu dochází k aktivaci a ionizaci molekul v ozářeném materiálu. Protože polymery potřebují vysoké dávky ozáření, používá se pro síťování plastů. [19]



Obr. 14. Záření beta. [19]

1 – hloubka vniknutí elektronů; 2 – primární elektrony; 3 – sekundární elektrony; 4 – ozářený materiál [19]

Záření gama má naopak malou intenzitu ozáření, ale vysokou schopnost pronikání materiálem. Záření gama se používá pro sterilizaci zdravotních produktů, nástrojů a potravin. [19]

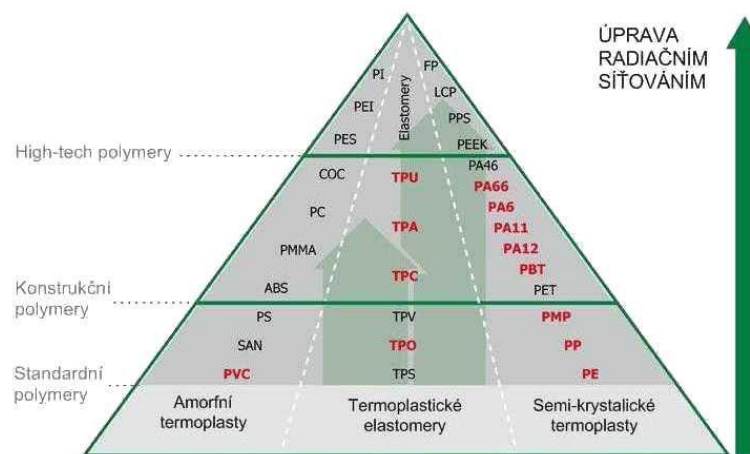


Obr. 15. Záření gama. [19]

1 – zapouzdřený zdroj záření CO^{60} ; 2 – γ kvanta; 3 – sekundární elektrony; 4 – ozářený materiál [19]

3.5 Radiačně síťované polymery

Při výběru vhodného materiálu jsou rozhodující užité vlastnosti výrobku. Pomocí radiačního síťování mohou ekonomicky vzniknout výrobky s mimořádnými technickými výhodami. Z hlediska objemu výroby jsou hlavními zástupci radiačně síťovaných polymerů polyethylen (PE), polyamidy (PA), polyvinylchlorid (PVC) a polybutyltereftalát (PBT). Obecně lze konstatovat, že radiační síťování je možné všude tam, kde je možné síťování pomocí volných radikálů. [19]



Obr. 16. Radiačně síťované polymery. [19]

3.5.1 Zlepšení vlastností po síťování

Zlepšení chemických vlastností:

- Zvýšení olejovzdornosti
- Snížení rozpustnosti
- Zlepšení odolnosti proti bobtnání
- Zlepšení odolnosti vůči hydrolyze
- Zvýšení odolnosti proti vzniku trhlin způsobených vnitřním pnutím

Zlepšení tepelných vlastností:

- Vyšší odolnost vůči stárnutí
- Zvýšení odolnosti proti vniknutí žhavého drátu

- Zlepšení tvarové stálosti za tepla
- Zlepšené trvalé deformace při zatížení tlakem
- Cílené nastavení tepelné roztažnosti
- Zvýšení tepelné odolnosti

Zlepšení mechanických vlastností:

- Zvýšení pevnosti, nárůst tvrdosti
- Zlepšení otěruvzdornosti
- Pokles poměrného prodloužení při přetížení
- Zlepšení meze únavy při střídavém ohybu
- Zlepšení odolnosti proti vnitřnímu pnutí a redukce přenosu a růstu
- Zlepšení zotavení materiálu
- Zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem
- Redukce studeného tečení (creepu)
- Nárůst modulu [19]

4 POLYAMIDY

Polyamidy jsou lineární polymery charakterizované hlavním polymerním řetězcem, v němž se pravidelně střídají skupiny $-\text{CO}-\text{NH}-$ s větším počtem skupin methylenových, tedy $-\text{CH}_2-$. Vyrábějí se převážně na základě technické realizace tří polyreakcí:

1. Polykondenzace aminokarboxylových skupin
2. Polymerace cyklických aminů (laktamů)

Významnými představiteli této skupiny jsou polyamid 6, polyamid 11 a taky polyamid 12.

3. Polykondenzace diaminů s dikarboxylovými kyselinami nebo jejich dichloridy

V této skupiny je významným představitelem polyamid 66 a polyamid 610. [15]

4.1 Vlastnosti polyamidů

Vlastnosti polyamidů se mění v závislosti na výchozích monomerech. Typické polyamidy jsou v tuhém stavu z 30 až 50 % krystalické a neprůhledné. Řetězové molekuly jsou propojovány vodíkovými můstky mezi amidovými skupinami. Jejich množství ovlivňuje krystalickou strukturu, bod tání T_g a většinu dalších vlastností. Vysoká houževnatost, tvrdost, odolnost proti oděru a dobré elektroizolační charakteristiky jsou vlastnosti, na nichž spočívá použití polyamidů jako plastů a vláken. Mechanické vlastnosti jsou závislé na typu, molekulové hmotnosti a obsahu vody. Nasákavost je dána koncentrací amidových skupin. Čím vyšší je poměr skupin $-\text{CONH}-$ a $-\text{CH}_2-$, tím větší je nasákavost a změkčující účinek vody. Jednotlivé typy se liší i bodem tání T_g a rozpustností v různě koncentrované kyselině mravenčí za normální teploty. Polyamidy mají úzký rozsah teplot tání a tuhnutí. Všechny polyamidy odolávají účinku pohonných látek, olejů a velké řady technických rozpouštědel i roztoků alkálií. [19]

4.1.1 Vlastnosti PA 66

- Rozměrová stálost
- Velmi dobré elektrotechnické vlastnosti
- Dlouhodobá funkčnost za vysokých teplot
- Dobrá houževnatost i za nízkých teplot

- Odolnost proti hydrolyze
- Vyšší tuhost
- Nižší navlhavost
- Odolnost proti oděru [21]

4.1.2 Oblast použití PA 66

Automobilový průmysl

- Kryty motoru
- Kryt řadící páky
- Dveřní držáky
- Zámky

Elektrotechnický a elektronický průmysl

- Řídicí rozvaděče
- Otáčivé vypínače a časovače

Spotřební průmysl

- Elektrické nářadí
- Ložiskové klece
- Čerpadla
- Pneumatické spojky
- Kabelové řetězce [21]

Tab. 4. Vliv poměru skupin $-\text{CONH}-$ a $-\text{CH}_2-$ na vlastnosti polyamidů. [20]

Typ	Poměr $\frac{-\text{CONH}-}{-\text{CH}_2-}$	Bod tání °C	$T_g/^\circ\text{C}$		Nasákavost/%		Rozpustnost v HCOOH %
			zasucha	zamokra	při 23 °C	po uložení ve vodě	
PA 6	1:5	220	70	20	3	10	70
PA 66	1:5	264	80	35	2,8	9	80
PA 610	1:7	215	70	40	1,4	3,3	90
PA 612	1:8	210	60	40	1,2	3	90
PA 11	1:10	190	55	–	0,8	1,8	nerozpustný
PA 12	1:11	180	55	–	0,7	1,5	nerozpustný

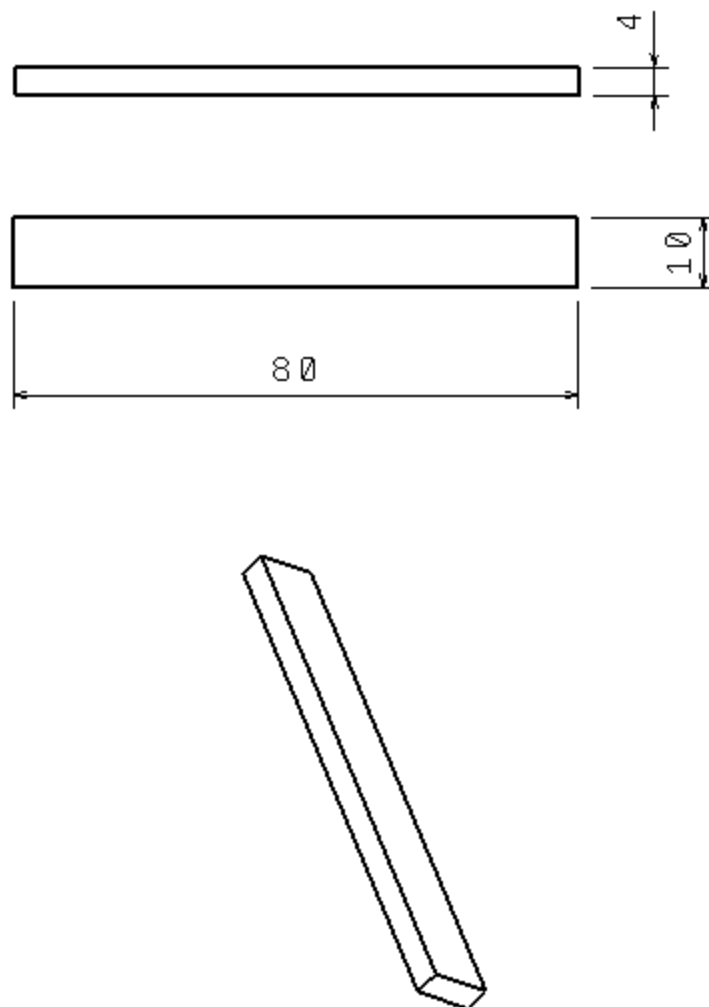
II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro měření experimentální části byl vybrán jako zkušební materiál Polyamid 66 (PA 66). Vzorky byly vstříkovány s přidáním 5 objemových % síťovacího činidla. Vzorky polyamidu 66 (PA 66) byly ozářeny v německé firmě „BETA-GAMA-SERVICE“ různými dávkami záření. Při měření se používal polyamid 66 (PA 66) neozářený, další vzorky byly ozářeny dávkou 15, 30, 45, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy.

5.1 Polyamid 66

Polyamid má výhodu ve vysokém bodu tání a poněkud vyšší pevnosti a o něco nižší navlhavosti než polyamid 6. Další výhodou ve srovnání s PA 6 je to, že neobsahuje volný polymer, takže odpadá jeho odstraňování. Polyamid 66 slouží v širokém měřítku jako plast i materiál pro výrobu vláken a fólií. [20]



Obr. 17. Rozměry zkoušeného vzorku PA66.

5.1.1 Výrobní parametry Polyamidu 66

Výrobní označení PA66 je PA66 V-PTS-CREAMID_C3H2*9200. Pro materiál použitý v této práci (PA66) je použito síťovací činidlo s označením TAIC. Toto činidlo umožní při ozařování základního materiálu, aby se jednotlivé volné radikály polyamidu chemicky navázaly na dané činidlo TAIC a vytvořil se tak určitý stupeň krystalizace (ten je závislý na dávce ozáření).

Síťovací činidlo TAIC, které bylo ve formě granulí, bylo přidáváno do polyamidu v množství 5 objemových %. Celkový proces přípravy prováděla firma PTS Plastic Technology Service, Hautschenmühle 3, Adelshofen, Deutschland.

5.1.2 Parametry vstřikování Polyamidu 66

Tab. 5. Vstřikovací parametry PA 66.

Parametry	PA66
Vstřikovací tlak [Bar]	60
Dotlak [MPa]	50
Dráha dávkování [mm]	40
Doba chlazení [s]	20
Teplota formy [°C]	80
Teplota taveniny [°C]	280
Teplota pod násypkou [°C]	70
Teplotní pásmo 1 [°C]	225
Teplotní pásmo 2 [°C]	255
Teplotní pásmo 3 [°C]	265
Teplotní pásmo 4 [°C]	275
Teplota trysky [°C]	280

5.2 Měřicí zařízení a vyhodnocení mikrotvrlosti

Jako měřicí přístroj v praktické části byl použit Micro-Combi-Tester od firmy CSM. Jako zkušební indenter byl použit Vickers. Přístroj se nachází na Ústavu výrobního inženýrství. Výsledky byly následně zpracovány a znázorněny v grafech MS excel.

5.3 Použité matematické vzorce

Získané výsledky z měření byly zpracovány v programu Microsoft Excel. Byly použité tyto vzorce:

Aritmetický průměr:

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

Kde: \bar{x} ...aritmetický průměr

n... počet měření

x...i-tá hodnota měřené veličiny

Směrodatná odchylka:

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

Kde:s...směrodatná odchylka

\bar{x} ...aritmetický průměr

n...počet měření

x...i-tá hodnota měřené veličiny

5.4 Vtisková tvrdost H_{IT}

Vtisková tvrdost H_{IT} je mírou resistance k trvalé deformaci nebo poškození. [4]

Rovnice tvrdosti:

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A_p} \quad [4]$$

kde: F_{\max} ... maximální zkušební zatížení

A_p ... je průmět (příčný řez) kontaktní plochy vnikacího tělesa a zkušební tělesa určený z křivky zatížení-hloubka vtisku a ze znalosti funkce plochy vnikacího tělesa [4]

5.5 Vtiskový modul E_{IT}

Vtiskový modul E_{IT} se může vypočítat ze směrnice tečny sloužící k výpočtu H_{IT} a je srovnatelný s Youngovým modulem materiálu. [4]

Rovnice E_{IT} :

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

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2C \cdot \sqrt{A_p}} \quad [4]$$

kde: v_s ... Poissonův poměr zkušební tělesa

v_i ... Poissonův poměr vnikacího tělesa

E_r ... redukovaný modul vtiskového kontaktu

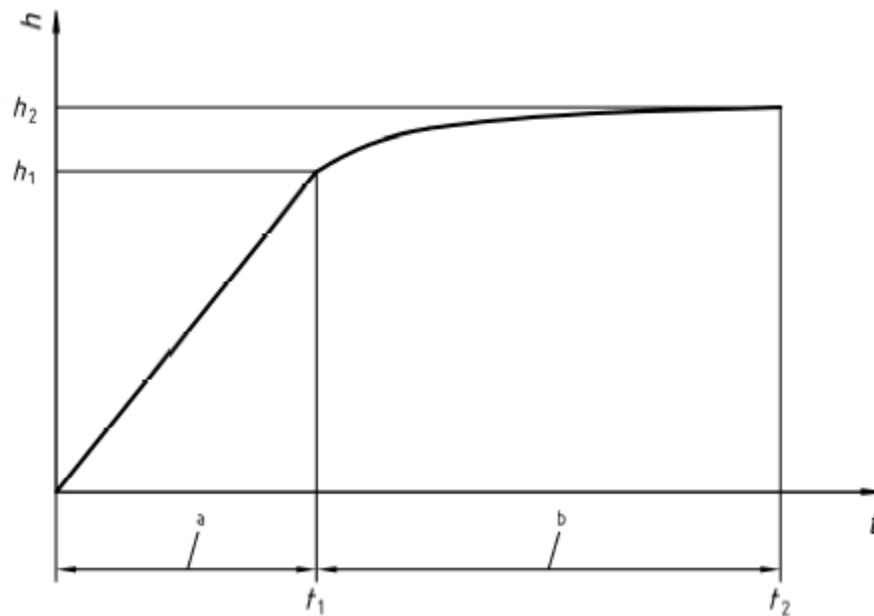
E_i ... modul vnikacího tělesa

C ... kontaktní poddajnost

A_p ... průmět kontaktní plochy [4]

5.6 Vtiskové tečení C_{IT}

Relativní změna hloubky vtisku (tečení) se označuje symbolem C_{IT} [4]



Obr. 18. Znárodnění vtiskového tečení. [4]

a-vložení zkušebního zatížení,

b-zkušební zařízení udržované na konstantní úrovni od t_1 do t_2

5.7 Plastická a pružná část práce vnikacího procesu

Celková deformační práce W_{total} vnikacího procesu je pouze částečně spotřebovaná jako deformační práce plastická, W_{plast} . V průběhu odlehčování zkušebního zatížení je zbytková část považována za práci pružné zpětné deformace, W_{elast} . Podle definice mechanické práce, $W=F \cdot dh$, se obě části na obr.19 jeví jako odlišné plochy.

Vztah:

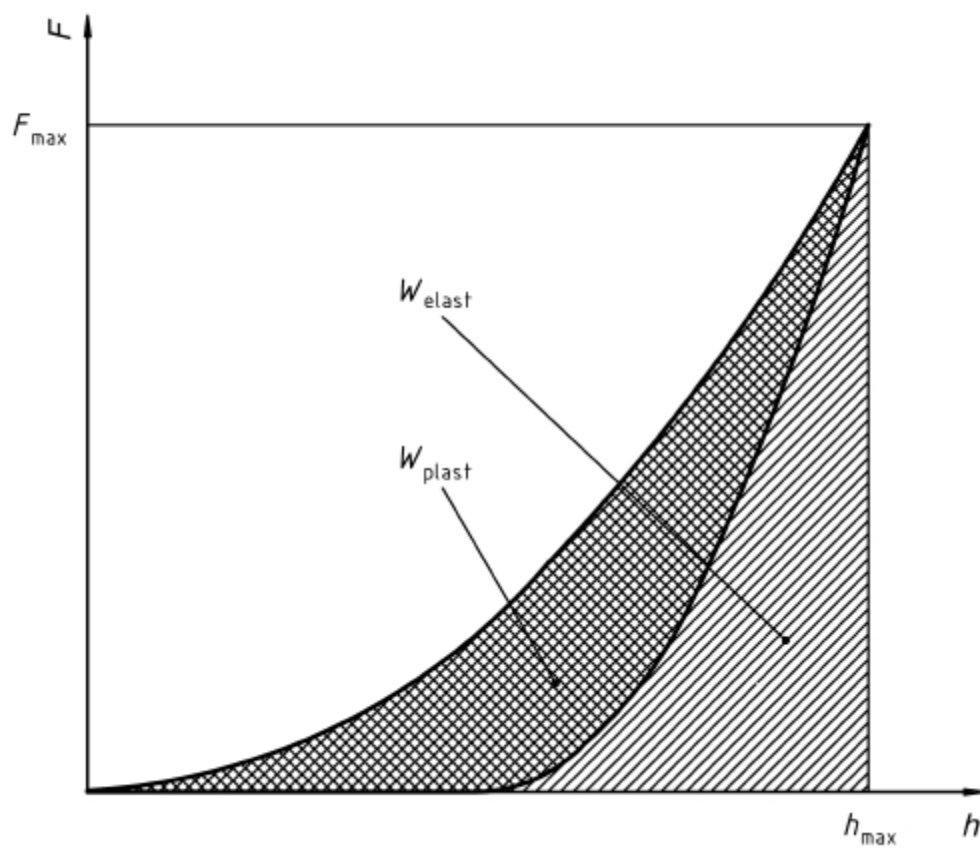
$$\eta_{\text{IT}} = \frac{W_{\text{elast}}}{W_{\text{plast}}} \cdot 100$$

obsahuje informaci, která je vhodná k charakterizování zkušebního tělesa, kde

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

Plastická část $W_{\text{plast}}/W_{\text{total}}$ je pak

$$100\% - \eta_{\text{IT}}$$



Obr. 19. Plastická a elastická deformační práce. [4]

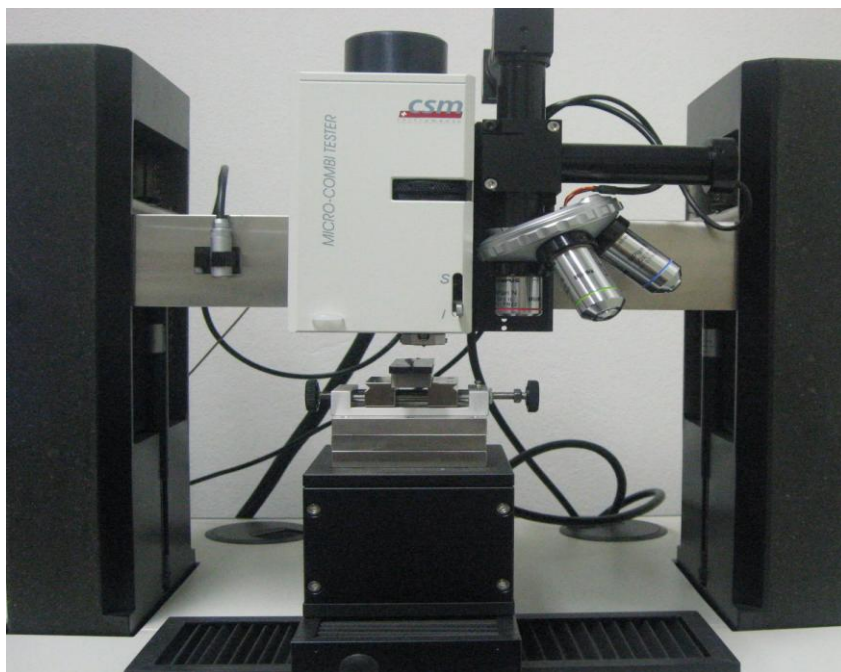
6 ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI

Měření mikrotvrdomosti se provedlo na Micro-Combi-Tester při zatížení 1N a 5N. Výdrž na zkušebním vzorku byla 90 s. Zatěžovací a odtěžovací rychlost byla zadána 2N/min. Na každém vzorku se provádělo maticovým způsobem 10 měření. Výsledky byly zpracovány v MS Excel. Jelikož instrumentovaná zkouška tvrdosti umožňuje propojení s počítačem, výsledky se do něj zaznamenávají a získali jsme hodnotu vtiskové tvrdosti HIT, vtiskový modul EIT, redukovaný modul tiskového kontaktu E_r , redukovaný modul E^* , tvrdost podle Vickerse, vtiskové tečení CIT, pružnou deformační práci vnikacího procesu w_{elast} , plasticou deformační práci w_{plast} , celkovou deformační práci vnikacího procesu W_{total} . Jednotlivé výsledky byly pomocí aritmetického průměru zpracovány a následně vyhodnoceny v grafu.

6.1 Zpracované výsledky měření

6.1.1 Vickersův indentor

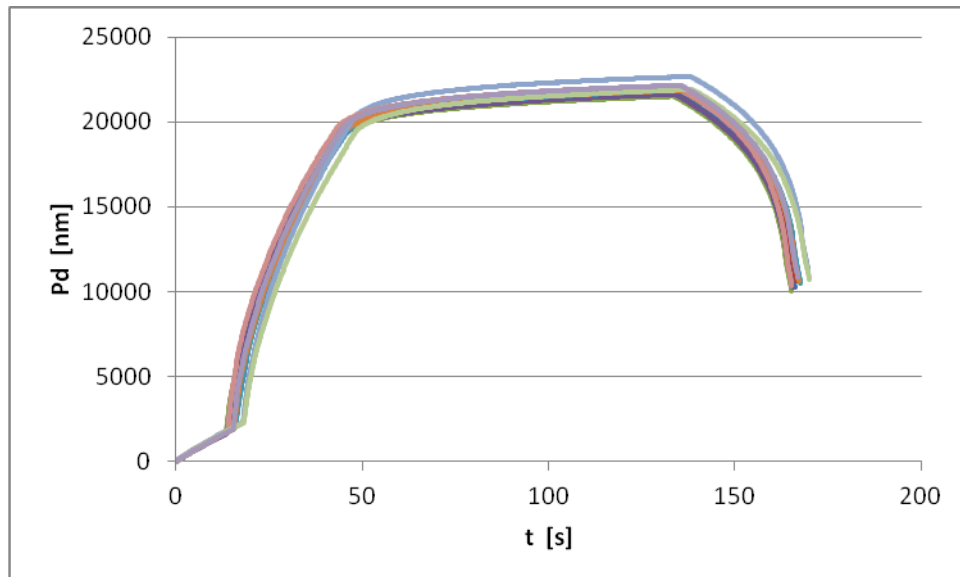
Měření probíhalo na Micro-Combi-Tester.



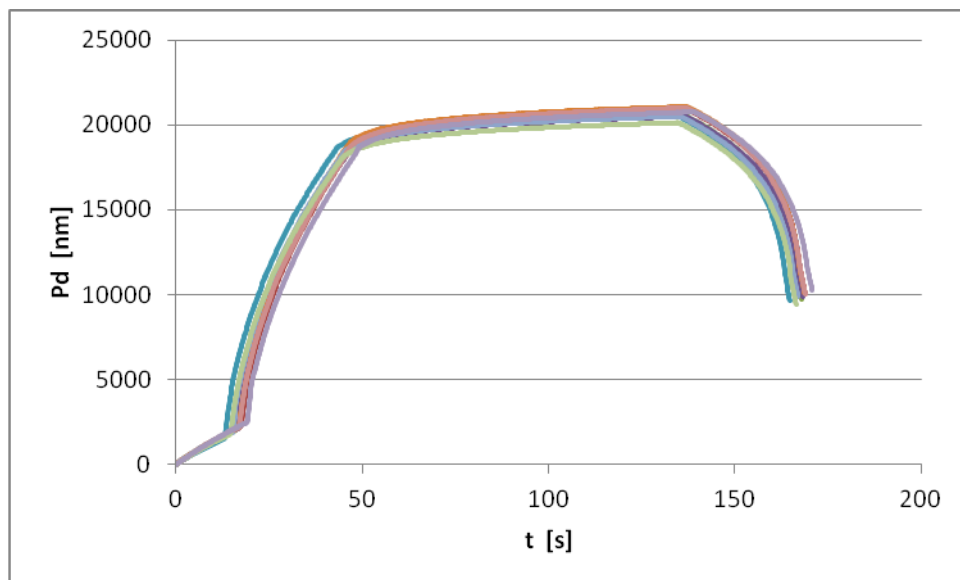
Obr. 20. Vickersův indentor.

6.1.2 Grafické znázornění výsledků

Naměřené hodnoty zkoušky mikrotvrdomosti pro zatížení 1 a 5 N u neozářeného PA66 a dávkou ozáření 165 kGy. Graficky byly zaznamenávány základní identifikační charakteristiky – závislost hloubky vtisku (P_d) na čase (t) a závislost síly (F_n) na hloubce vtisku (P_d).

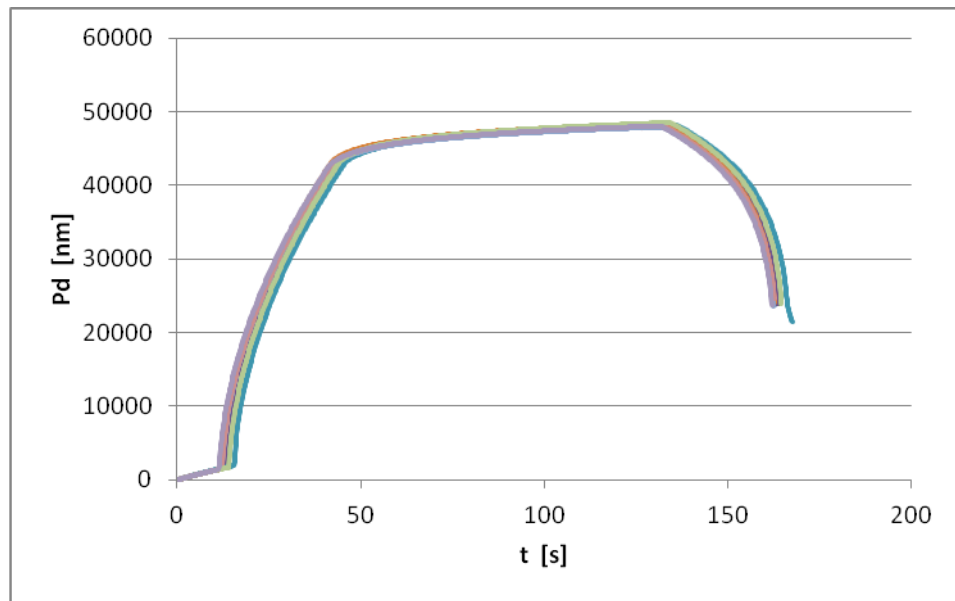


Obr. 21. Zatížení 1N pro neozářený PA66.

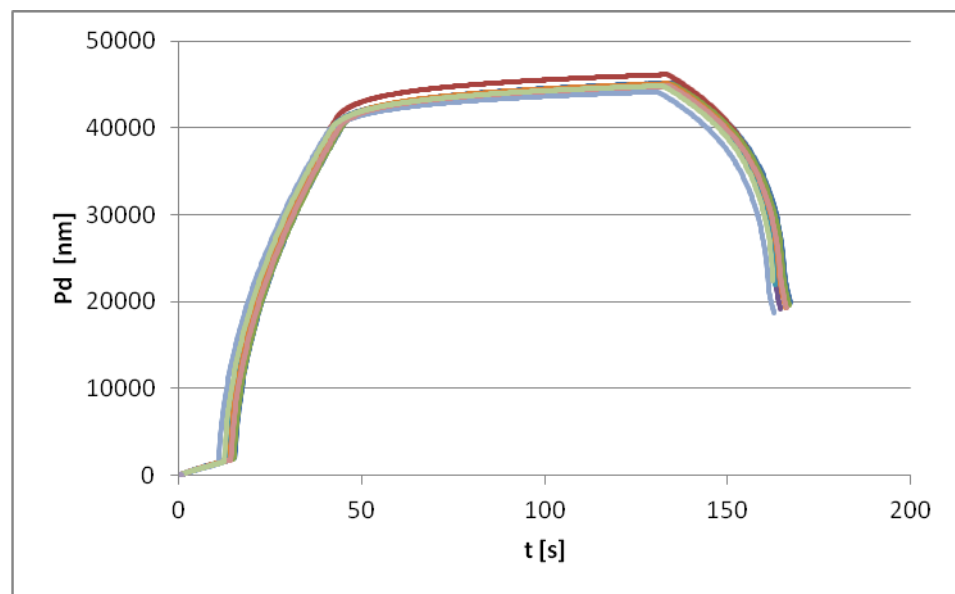


Obr. 22. Zatížení 1N pro dávkou ozáření 165 kGy.

Z obou grafů je patrné, že u neozářeného PA66 je větší hloubka vtisku (P_d) v závislosti na čase (t) než u PA66, jenž byl ozářený dávkou 165kGy. Graf nám vypovídá o chování materiálu při daném zatížení a jeho následných vlastnostech.

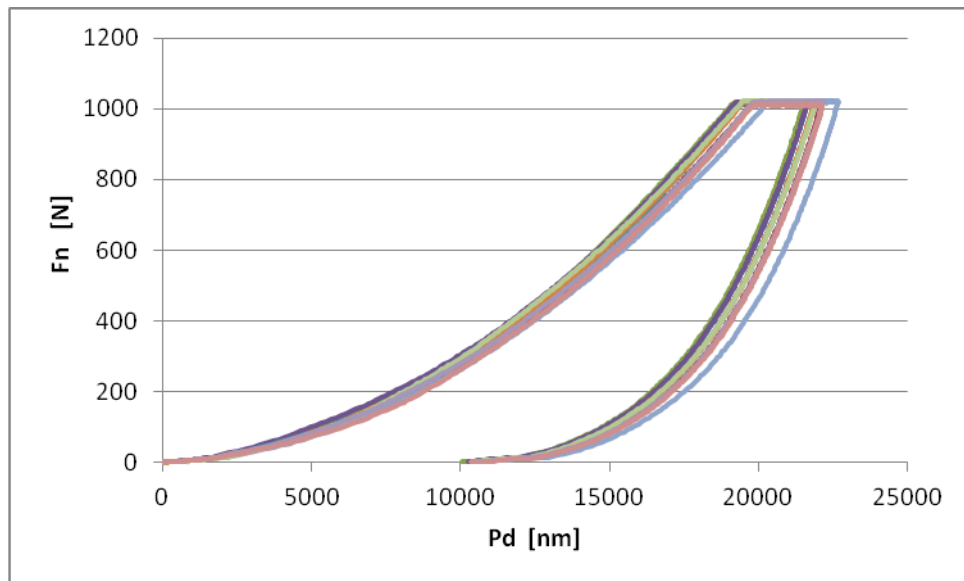


Obr. 23. Zatížení 5N pro neozářený PA66.

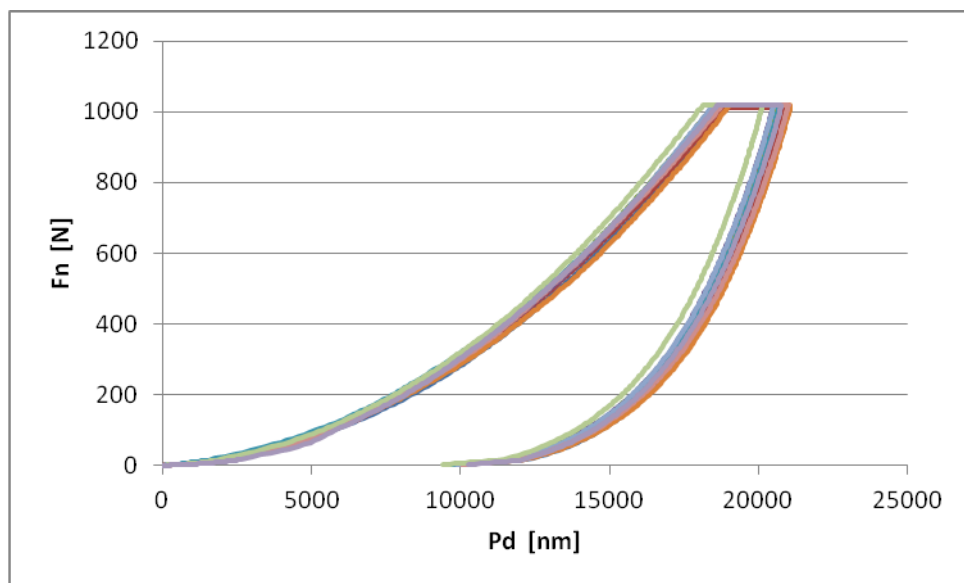


Obr. 24. Zatížení 5N pro dávku ozáření 165 kGy.

Z naměřených hodnot vyplývá, že menší hloubka vtisku (P_d) v závislosti na čase (t), byla stejně jako u zatížení 1N naměřena u PA66, který byl ozářený dávkou 165 kGy.

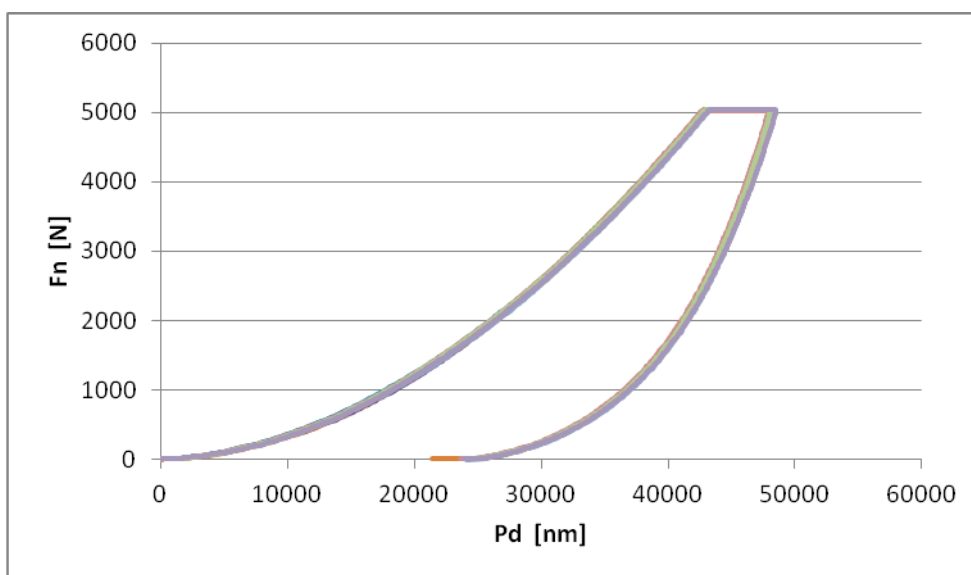


Obr. 25. Zatížení 1N pro neozářený PA66.

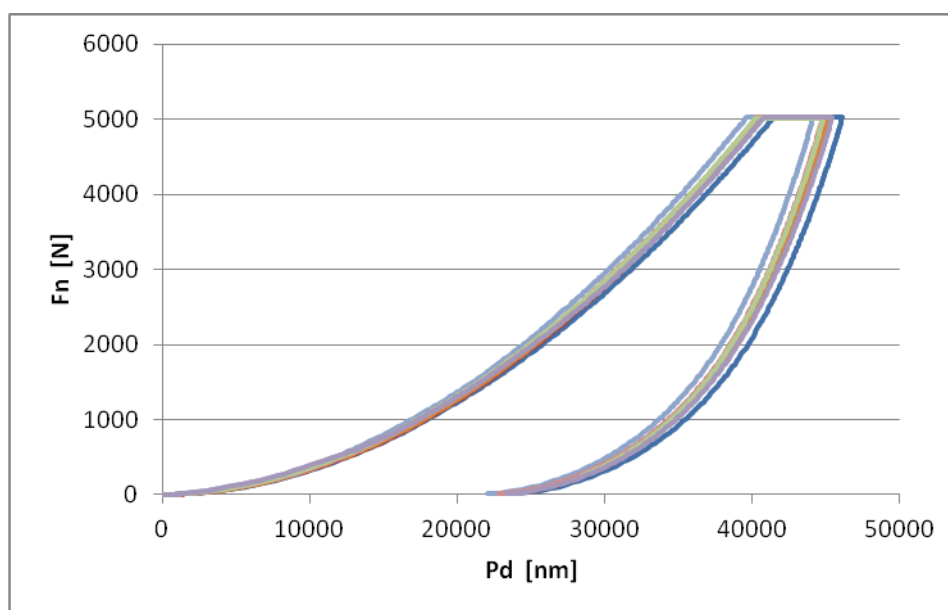


Obr. 26. Zatížení 1N pro dávku ozáření 165 kGy.

V závislosti síly (F_n) na hloubce vtisku (P_d) je patrné, že byla naměřena větší hloubka vtisku u neozářeného PA66. Při největším zatížení byla hloubka vtisku u neozářeného PA66 téměř 23000 nm.



Obr. 27. Zatížení 5N pro neozářený PA66.



Obr. 28. Zatížení 5N pro dávku ozáření 165 kGy.

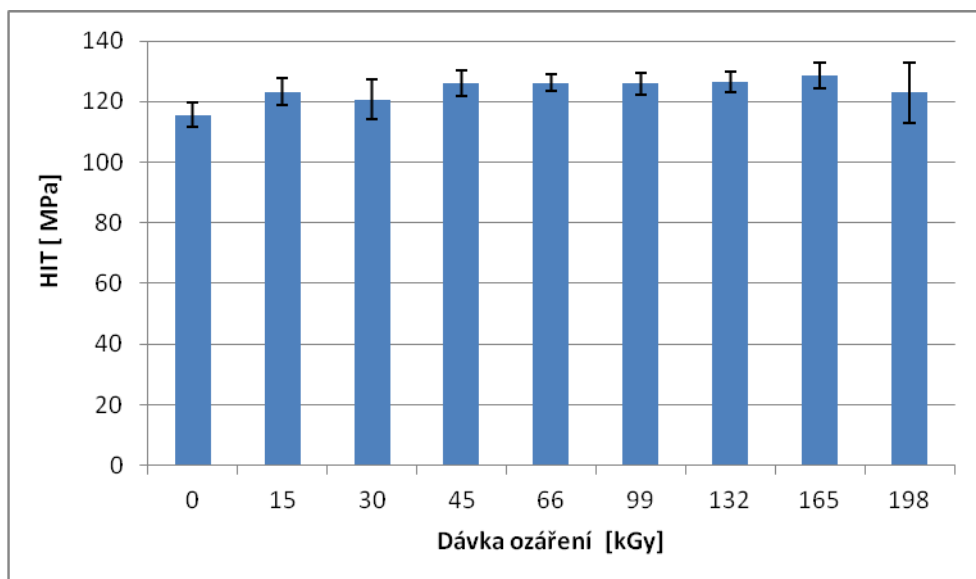
Z výsledků zkoušky mikrotvrdomosti je patrné, že větší hloubka vtisku (P_d) v závislosti na síle (F_n) byla opět naměřena u neozářeného PA66 a to téměř 50000 nm a u PA66, jenž byl ozářený dávkou 165kGy byla hloubka vtisku 45000 nm.

6.1.3 Naměřené data pro zatížení 1 N

Naměřené hodnoty byly pomocí matematických vzorců zpracovány a v Tab. 6 jsou zobrazeny průměrné hodnoty pro všechny dávky ozáření.

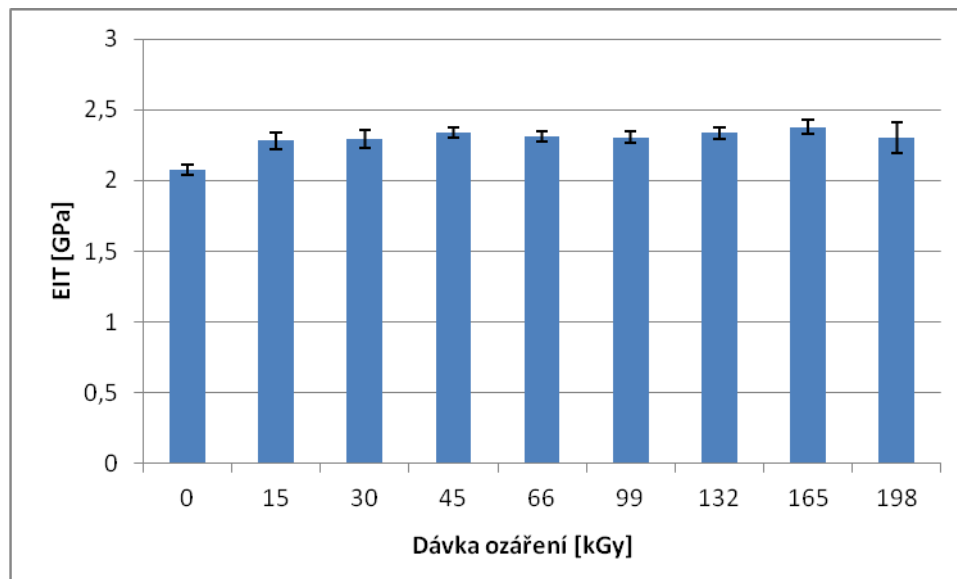
Tab. 6. Hodnoty PA 66 při zatížení 1 N.

	0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy
HIT [Mpa]	115,65	123,31	120,72	126,21	126,1
EIT [Gpa]	2,08	2,28	2,29	2,33	2,31
Er [Gpa]	2,28	2,5	2,51	2,56	2,53
E* [Gpa]	2,28	2,51	2,52	2,56	2,54
HV[Vickers]	10,92	11,64	11,39	11,91	11,9
CIT [%]	12,1	11,09	10,69	10,75	11,29
RIT [%]	-0,06	-0,06	-0,07	-0,06	-0,08
	99 kGy	132kGy	165kGy	195kGy	
HIT [Mpa]	125,96	126,56	128,72	122,95	
EIT [Gpa]	2,3	2,33	2,38	2,3	
Er [Gpa]	2,53	2,56	2,61	2,53	
E* [Gpa]	2,53	2,57	2,61	2,53	
HV[Vickers]	11,89	11,95	12,15	11,6	
CIT [%]	11,29	11,11	11,12	10,89	
RIT [%]	-0,06	-0,06	-0,07	-0,06	



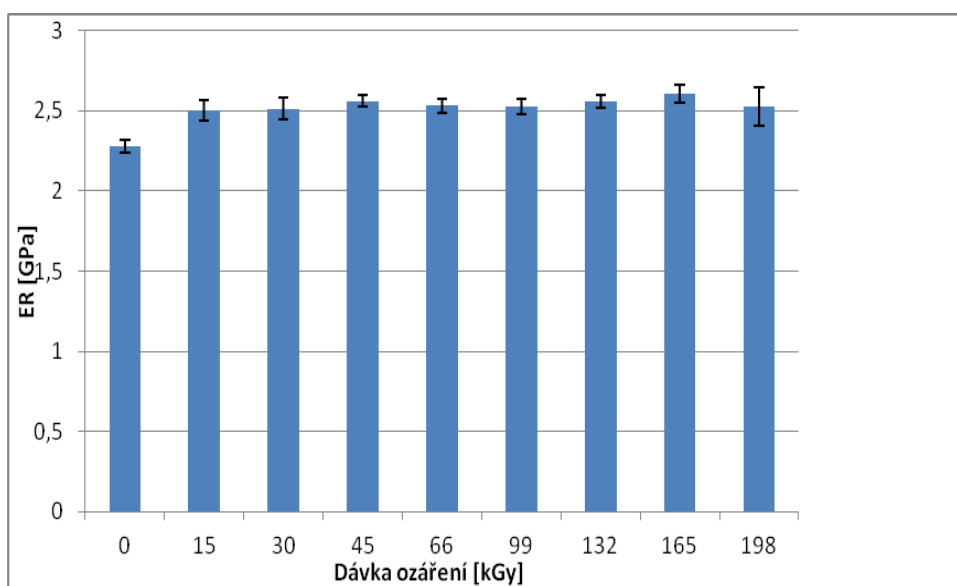
Obr. 29. Vtisková tvrdost HIT PA66.

Při zkoušce mikrotvrdomosti byla naměřená nejmenší vtisková tvrdost HIT u ozáření 0 kGy. Naopak největší vtisková tvrdost HIT byla naměřená u ozáření 165 kGy. (viz Obr.29 a Tab. 6). Nárůst vtiskové tvrdosti mezi neozařeným PA66 a dávkou ozáření 165 kGy činí 10 %.



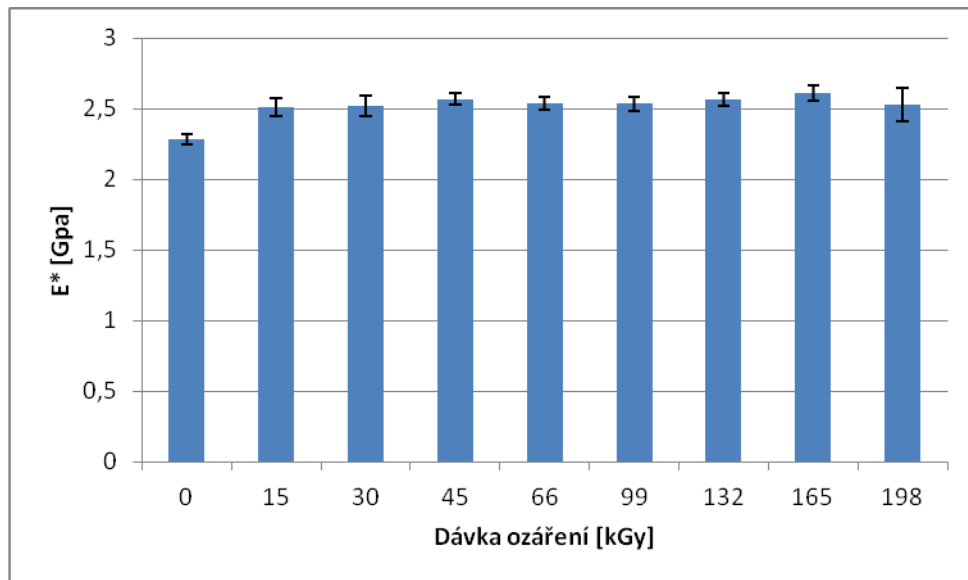
Obr. 30. Vtiskový modul pružnosti EIT PA66.

Z výsledků instrumentované zkoušky vyplývá, že nejmenší vtiskový modul pružnosti EIT byl naměřen u ozáření 0 kGy. Zatímco největší vtiskový modul EIT byl naměřený u ozáření 165 kGy. (viz Obr.30 a Tab.6)



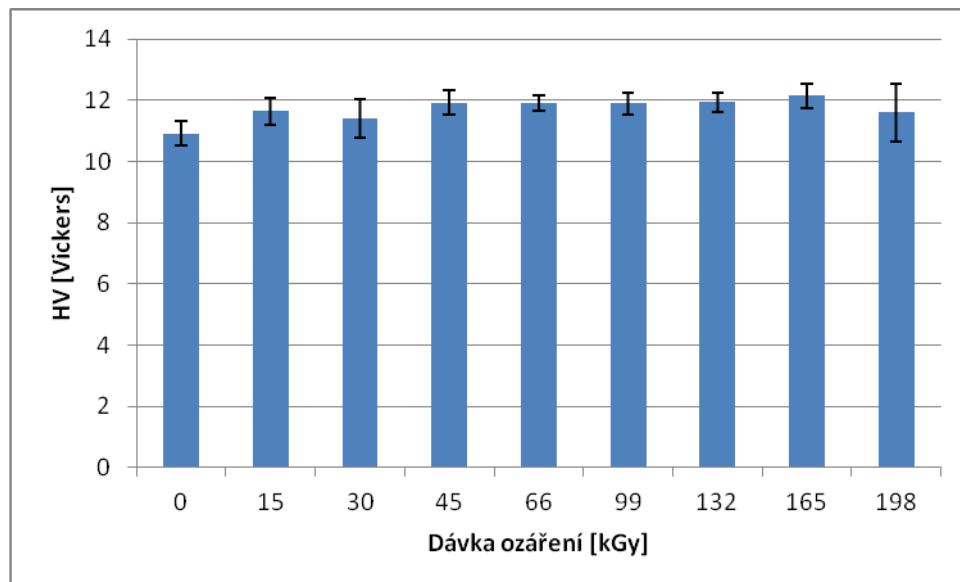
Obr. 31. Redukovaný modul tiskového kontaktu ER PA66.

Z výsledků je patrné, že nejmenší redukovaný modul tiskového kontaktu ER byl naměřen u ozáření 0 kGy. Naopak největší redukovaný modul tiskového kontaktu ER byl zjištěný u ozáření 165 kGy. (viz Obr.31 a Tab.6)



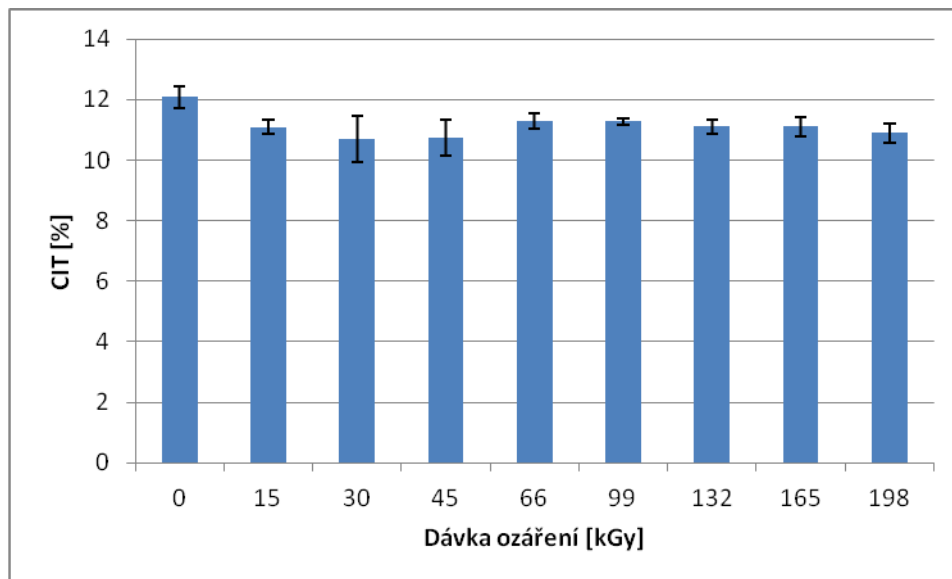
Obr. 32. Modul pružnosti E^* PA66.

Nejmenší modul pružnosti E^* byl naměřený u ozáření 0 kGy, zatímco největší modul pružnosti E^* byl naměřený u ozáření 165 kGy.(viz Obr. 32 a Tab.6)



Obr. 33. Tvrdost podle Vickerse HV PA66.

Z výsledků měření mikrotvrdomosti byla zjištěna nejmenší hodnota tvrdosti podle Vickerse u ozáření 0 kGy. Naopak největší hodnota tvrdosti podle Vickerse byla naměřena u ozáření 165 kGy. (viz Obr.33 a Tab.6)

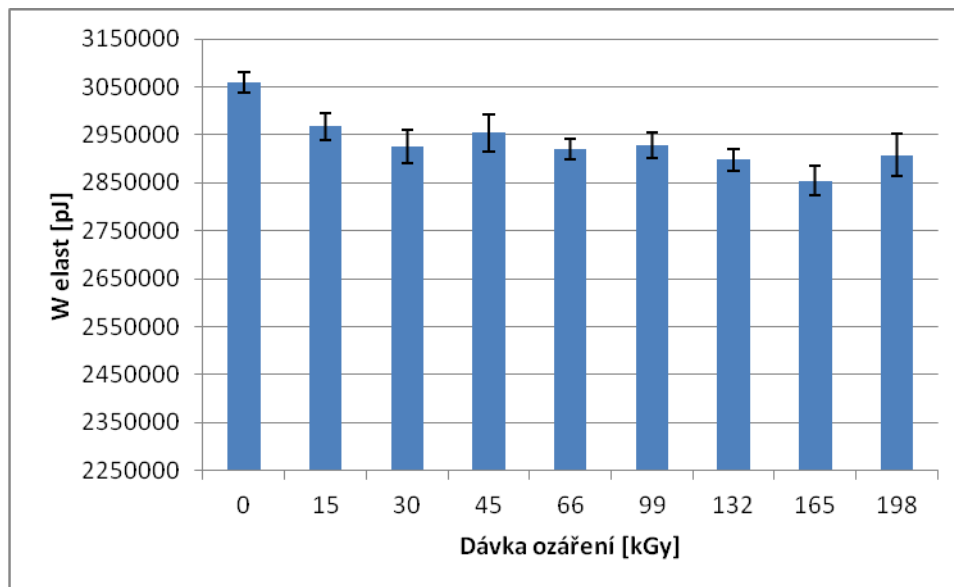


Obr. 34. Vtiskové tečení CIT PA66.

Nejmenší vtiskové tečení CIT bylo naměřeno u ozáření 30 kGy, zatímco největší vtiskové tečení CIT bylo naměřeno u ozáření 0 kGy. (viz Obr. 34 a Tab.6)

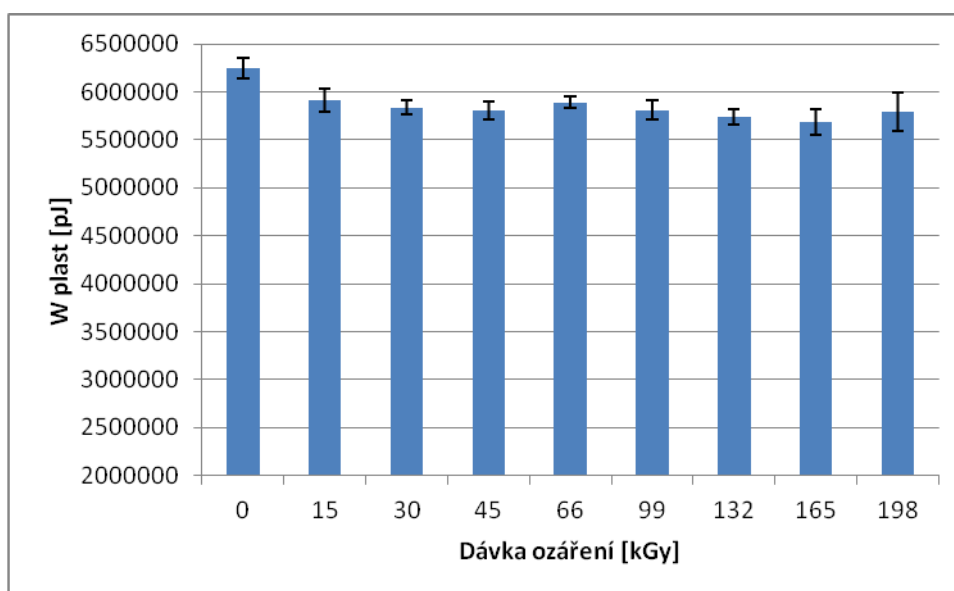
Tab. 7. Hodnoty PA66 při zatížení 1 N.

	0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy
W_{elast} [pJ]	3059972	2967674	2925364	2953804	2919628
W_{plast} [pJ]	6247469	5912468	5838691	5803895	5890984
W_{total} [pJ]	9307440	8880152	8757055	8757699	8810593
	99 kGy	132 kGy	165 kGy	195 kGy	
W_{elast} [pJ]	2928034	2898154	2853896	2907636	
W_{plast} [pJ]	5811120	5743557	5684350	5790207	
W_{total} [pJ]	8739154	8641711	8538246	8697844	



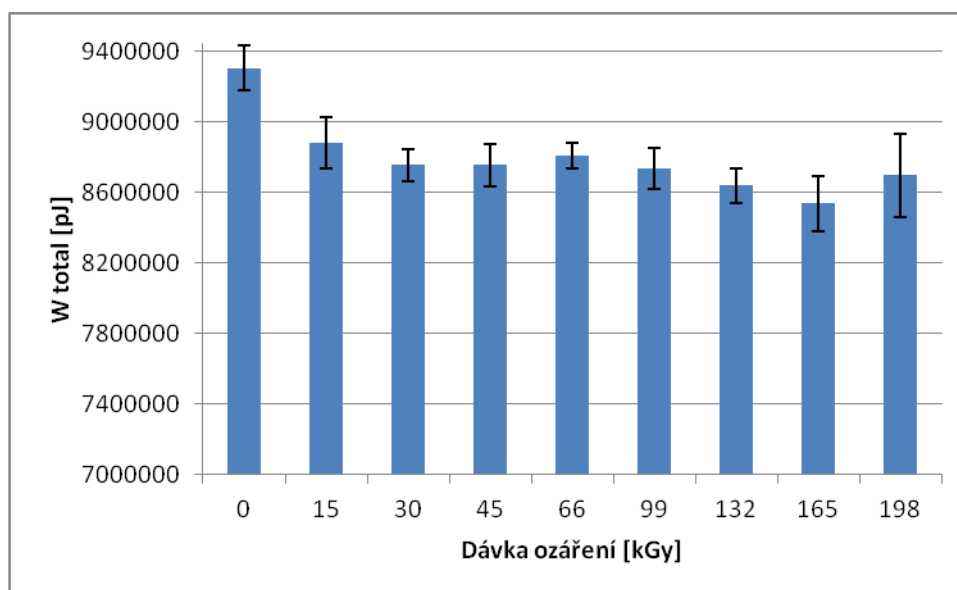
Obr. 35. Pružná deformační práce vnikacího procesu PA66.

Při zkoušce mikrotvrlosti byla naměřená nejmenší pružná deformační práce vnikacího procesu u ozáření 165 kGy. Naopak největší pružná deformační práce vnikacího procesu byla naměřená u ozáření 0 kGy. (viz Obr.35 a Tab.7)



Obr. 36. Plastická deformační práce W_{plast} PA66.

Z výsledků je patrné, že při zkoušce mikrotvrlosti byla naměřená nejmenší plastická deformační práce W_{plast} u ozáření 165 kGy. Kdežto největší plastická deformační práce W_{plast} byla zjištěna u ozáření 0 kGy. (viz Obr.36 a Tab.7)



Obr. 37. Celková deformační práce vnikacího procesu W_{total} PA66.

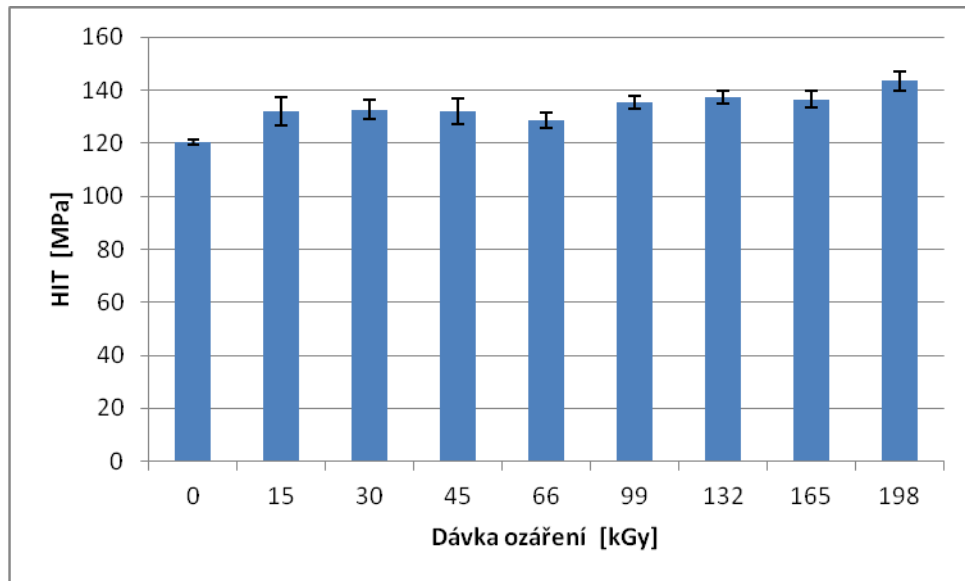
Nejmenší celková deformační práce vnikacího procesu W_{total} byla při zkoušce mikrotvrdosti zjištěna u ozáření 165 kGy, zatímco největší celková deformační práce vnikacího procesu W_{total} byla naměřena u ozáření 0 kGy. (viz Obr.37 a Tab.7)

6.1.4 Naměřené hodnoty pro zatížení 5 N

Naměřené hodnoty byly pomocí matematických vzorců zpracovány a v Tab. 8. jsou zobrazeny průměrné hodnoty pro všechny dávky ozáření.

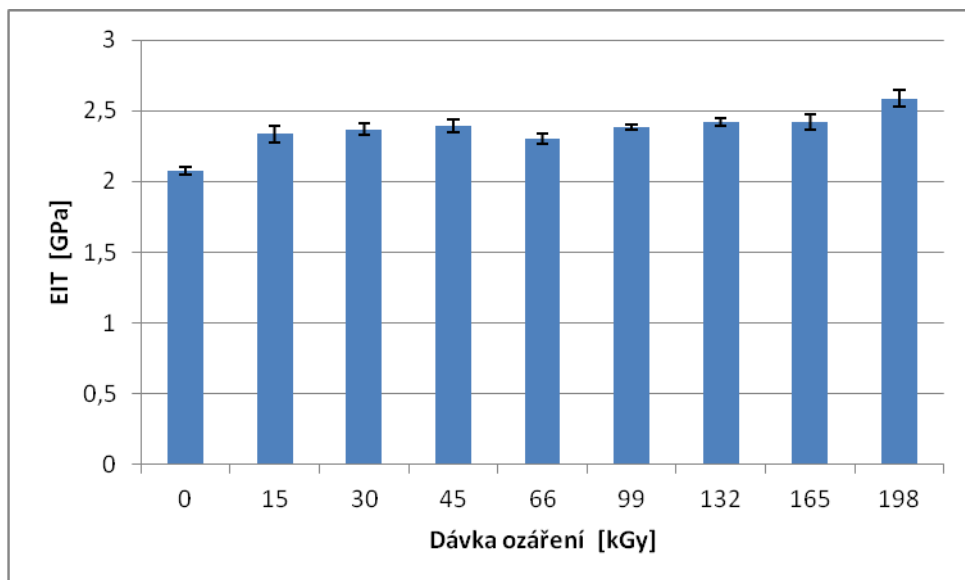
Tab. 8. Hodnoty PA66 při zatížení 5 N.

	0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66kGy
HIT [Mpa]	120,19	131,99	132,54	132,01	128,73
EIT [Gpa]	2,08	2,34	2,38	2,39	2,31
Er [Gpa]	2,28	2,57	2,6	2,62	2,52
E* [Gpa]	2,28	2,57	2,6	2,63	2,53
HV[Vickers]	11,34	12,46	12,51	12,46	12,15
CIT [%]	10,82	10,82	10,78	10,18	11,33
RIT [%]	-0,05	-0,05	-0,04	-0,04	-0,1
	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy	
HIT [Mpa]	135,31	137,3	136,4	143,41	
EIT [Gpa]	2,38	2,42	2,42	2,59	
Er [Gpa]	2,61	2,66	2,65	2,84	
E* [Gpa]	2,62	2,66	2,66	2,84	
HV[Vickers]	12,77	12,96	12,87	13,54	
CIT [%]	11,28	10,93	11,08	10,50	
RIT [%]	-0,08	-0,08	-0,05	-0,06	



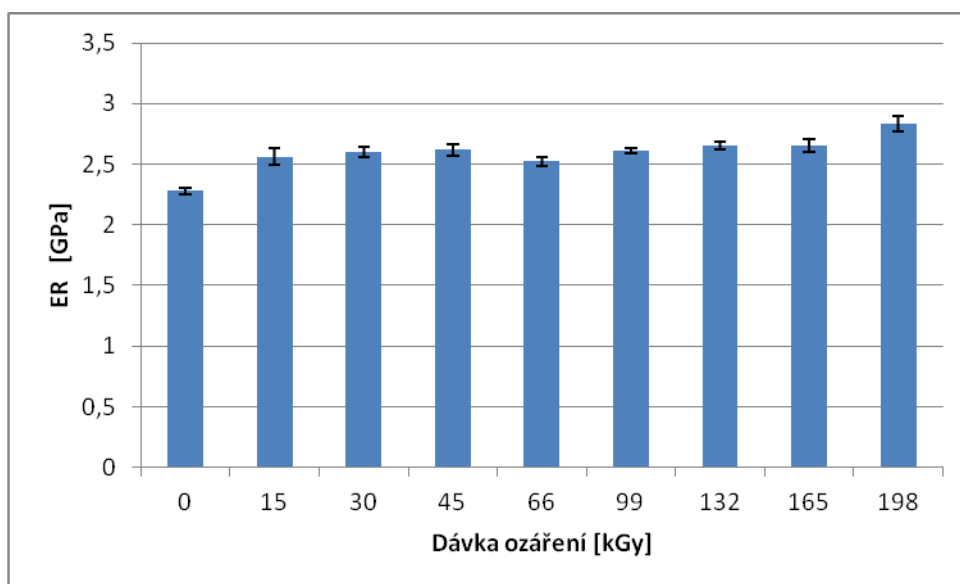
Obr. 38. Vtisková tvrdost HIT PA66.

Z výsledků měření mikrotvrdosti byla zjištěna nejmenší vtisková tvrdost HIT u ozáření 0 kGy, zatímco největší vtisková tvrdost HIT byla naměřená u ozáření 198 kGy. (viz Obr.38 a Tab.8). Vtisková tvrdost se mezi největší a nejmenší hodnotou zvětšila o 16 %.



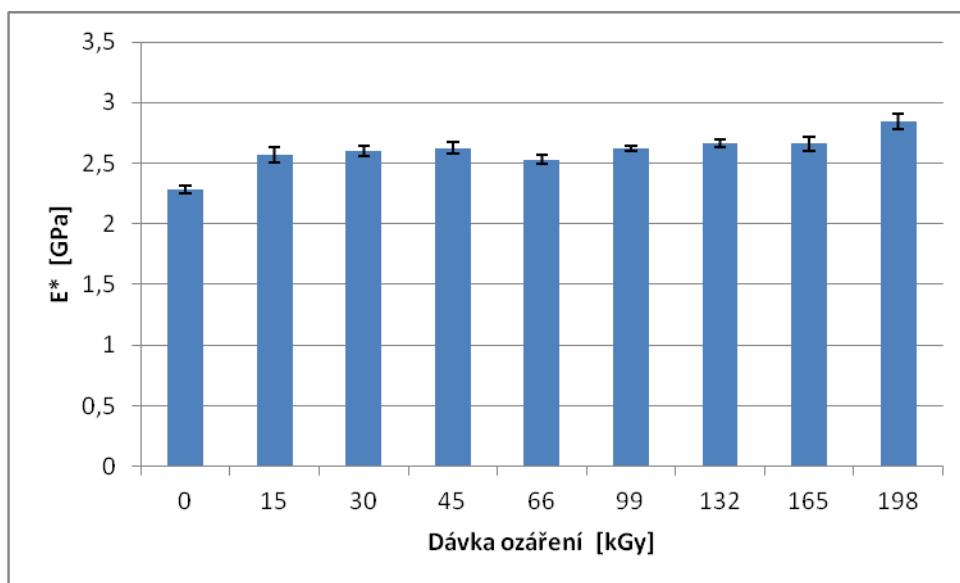
Obr. 39. Vtiskový modul pružnosti EIT PA66.

Při zkoušce mikrotvrdosti byl naměřený nejmenší vtiskový modul pružnosti EIT u ozáření 0 kGy. Naopak největší vtiskový modul EIT byl naměřený u ozáření 198 kGy. (viz Obr.39 a Tab.8)



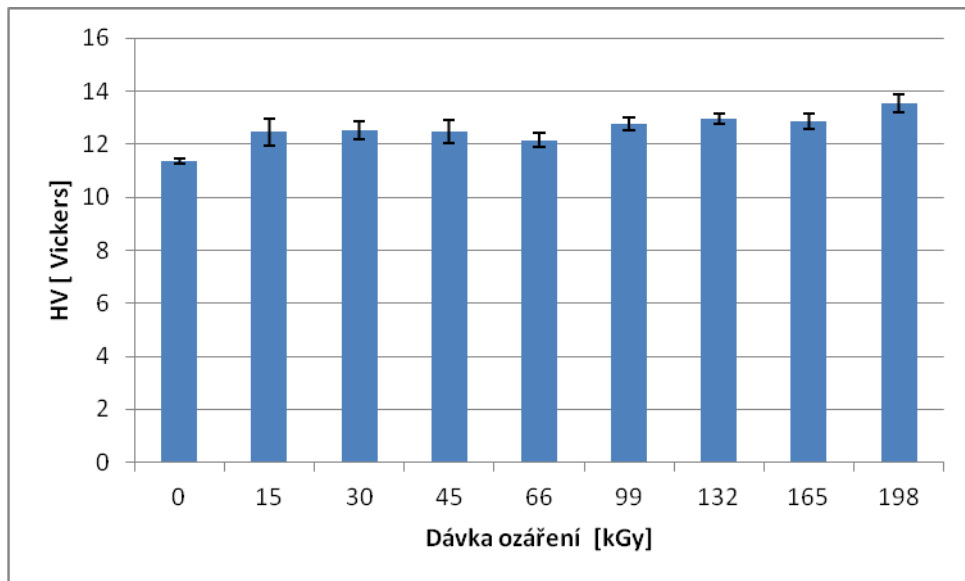
Obr. 40. Redukovaný modul tiskového kontaktu ER PA66.

Z instrumentované zkoušky tvrdosti je patrné, že nejmenší redukovaný modul tiskového kontaktu ER byl naměřený u ozáření 0 kGy, kdežto největší redukovaný modul tiskového kontaktu ER byl naměřený u ozáření 198 kGy. (viz Obr.40 a Tab.8)



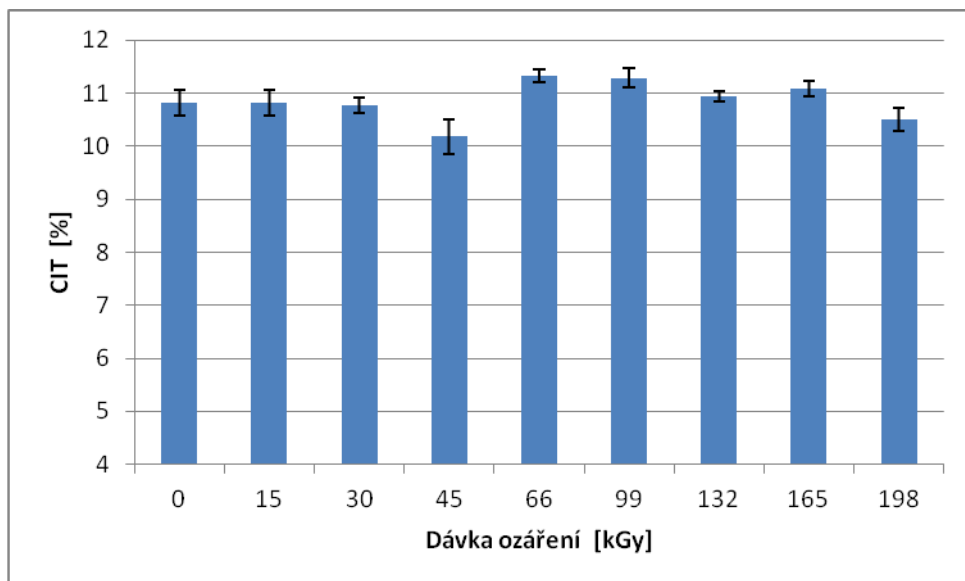
Obr. 41. Modul pružnosti E* PA66.

Nejmenší modul pružnosti E* při zkoušce mikrotvrdosti byl naměřený u ozáření 0 kGy zatímco, největší modul pružnosti E* byl zjištěn u ozáření 198 kGy. (viz Obr.41 a Tab.8)



Obr. 42. Tvrdot podle Vickerse HV PA66.

Z výsledků je zřejmé, že nejmenší naměřená hodnota tvrdosti podle Vickerse byla zjištěna u ozáření 0 kGy. Kdežto největší hodnota tvrdosti podle Vickerse byla u ozáření 198 kGy. (viz Obr.42 a Tab.8)

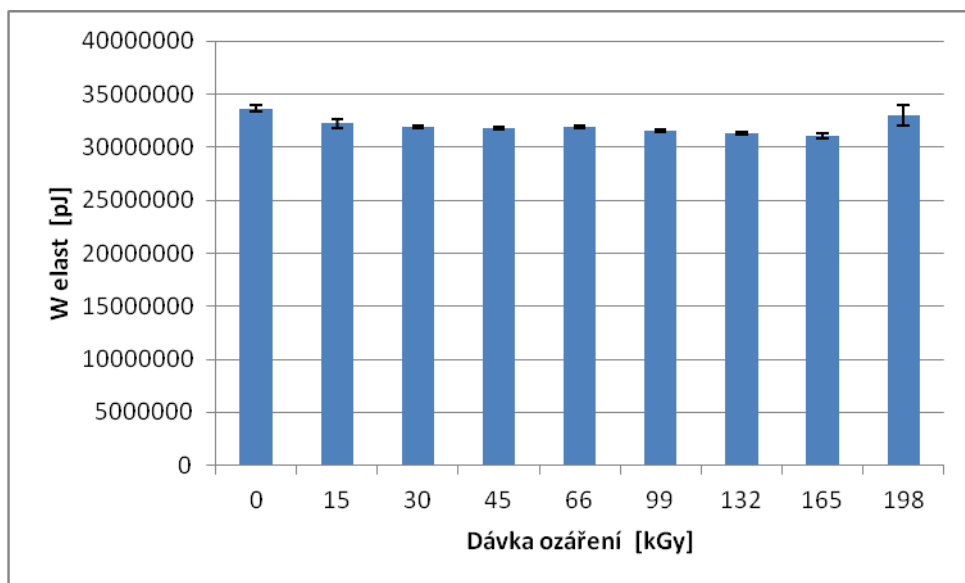


Obr. 43. Vtiskové tečení CIT PA66.

Při zkoušce mikrotvrdoti bylo zjištěno nejmenší vtiskové tečení CIT u ozáření 45 kGy. Naopak největší vtiskové tečení CIT bylo naměřené u ozáření 66 kGy. (viz Obr.43 a Tab.8)

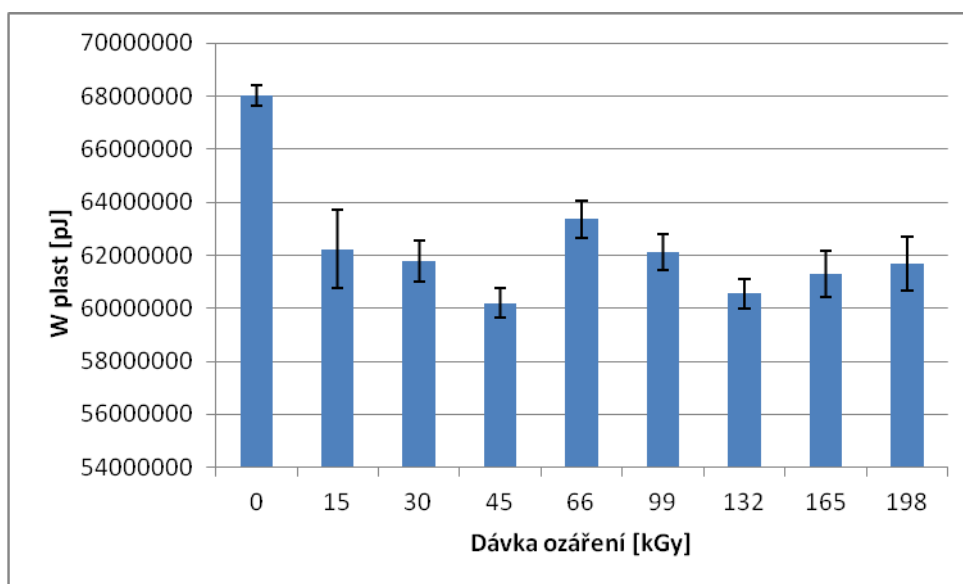
Tab. 9. Hodnoty PA66 při zatížení 5 N.

	0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy
W_{elast} [pJ]	33643119	32245324	31913090	31752523	31917617
W_{plast} [pJ]	68017000	62232575	61772727	60190169	63354696
W_{total} [pJ]	102112208	94477899	93685817	91942693	95272313
	99 kGy	132 kGy	165 kGy	195 kGy	
W_{elast} [pJ]	31578032	31338034	31070472	32984843	
W_{plast} [pJ]	63354696	62109953	60543103	61292058	
W_{total} [pJ]	93687985	91881137	92362530	88549869	



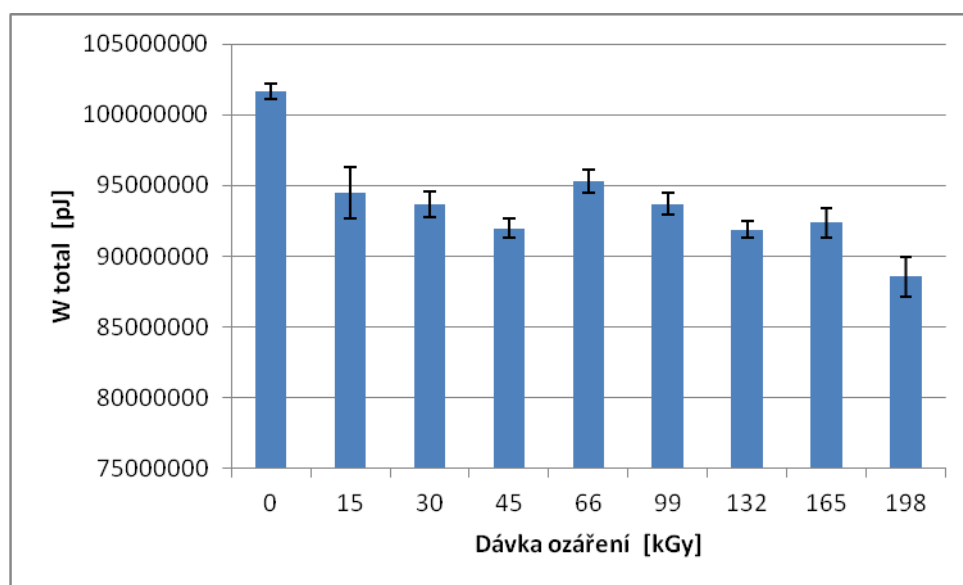
Obr. 44. Pružná deformační práce vnikacího procesu PA66.

Nejmenší pružná deformační práce vnikacího procesu byla naměřena u ozáření 165 kGy. Zatímco největší pružná deformační práce vnikacího procesu byla zjištěna u ozáření 0 kGy. (viz Obr.44 a Tab.9)



Obr. 45. Plastická deformační práce W_{plast} PA66.

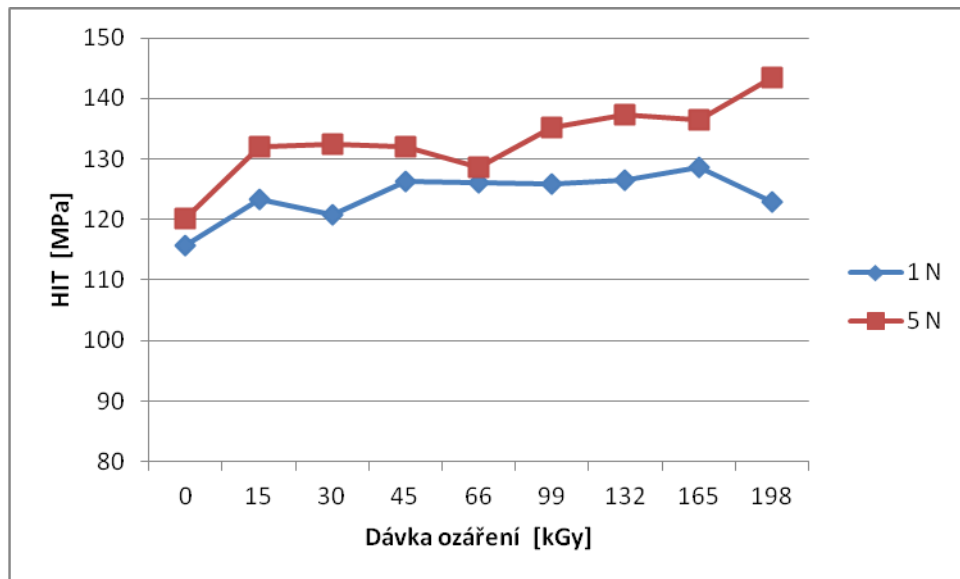
Z výsledků instrumentované zkoušky tvrdosti byla naměřena nejmenší plastická deformační práce W_{plast} u ozáření 45 kGy. Kdežto největší plastická deformační práce W_{plast} byla naměřena u ozáření 0 kGy. (viz Obr.45 a Tab.9)



Obr. 46. Celková deformační práce vnikacího procesu W_{total} PA66.

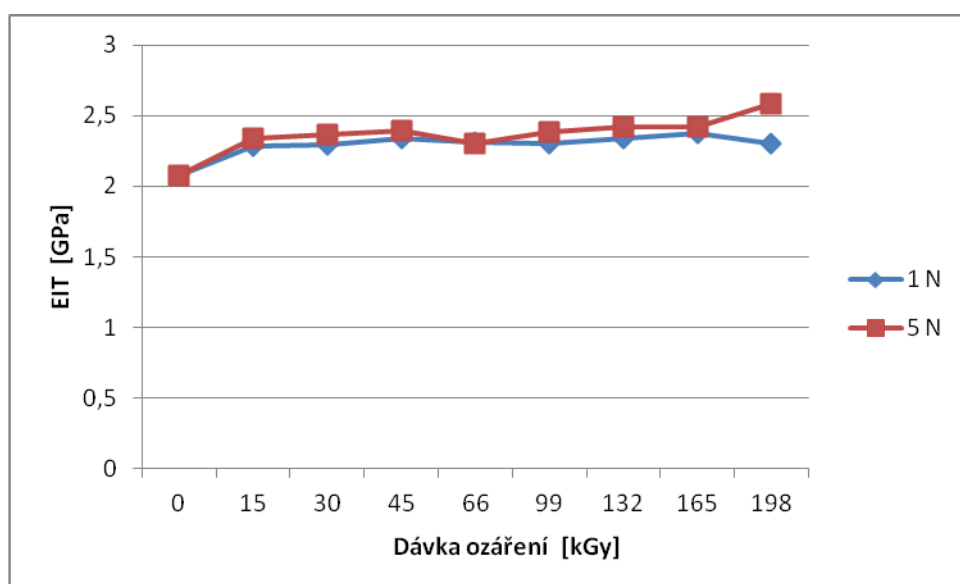
Při zkoušce mikrotvrdosti byla naměřena nejmenší deformační práce vnikacího procesu W_{total} u ozáření 198 kGy. Naopak největší deformační práce vnikacího procesu W_{total} byla naměřena u ozáření 0 kGy. (viz Obr.46 a Tab.9)

7 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT



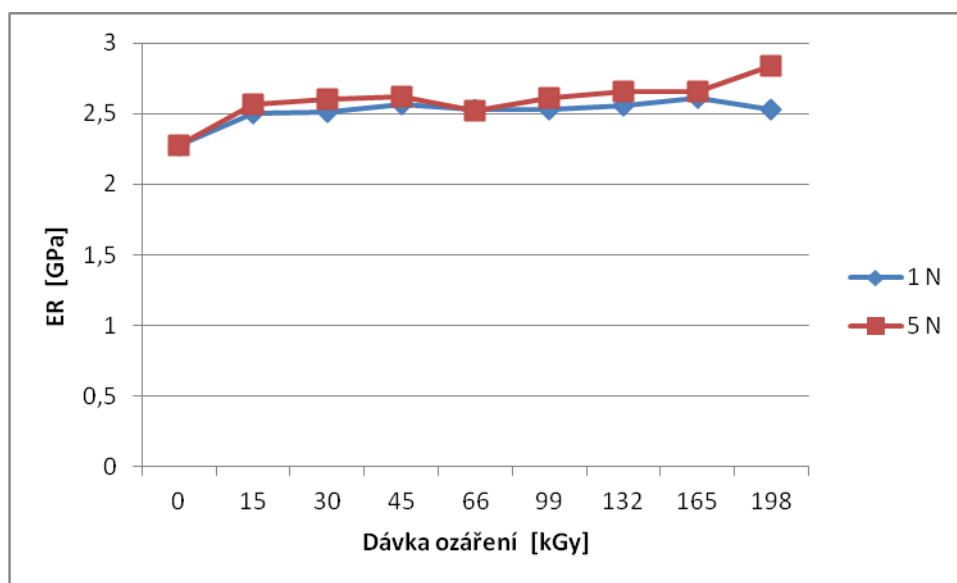
Obr. 47. Vtisková tvrdost HIT.

Z výsledku měření mikrotvrdomosti vyplývá, že vtisková tvrdost HIT byla při zatížení 1 N menší než při zatížení 5 N. Největší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena při zatížení 5 N a dávce ozáření 198 kGy. Nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena při zatížení 1 N a dávce ozáření 0 kGy. Mezi největší a nejmenší hodnotou vtiskové tvrdosti HIT je rozdíl 19 %.



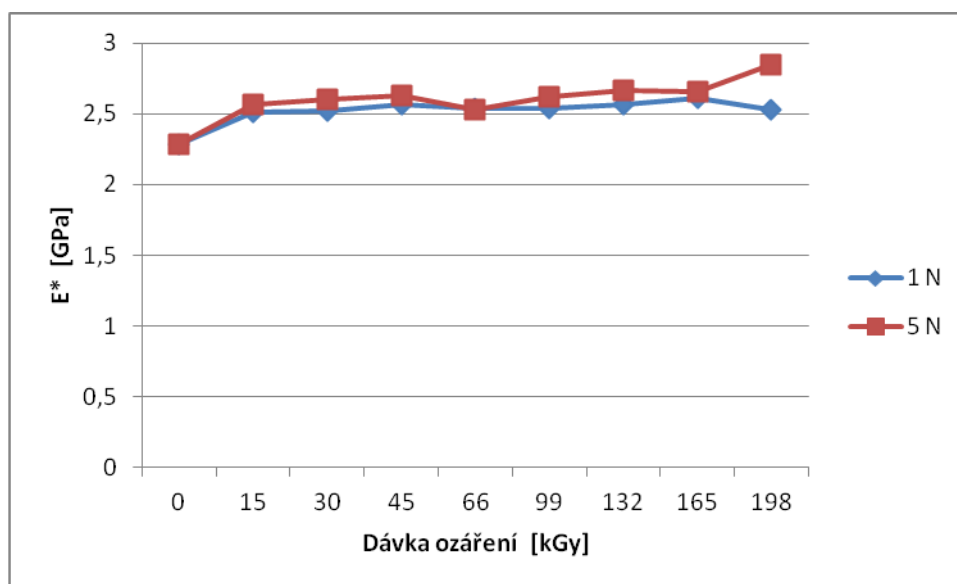
Obr. 48. Vtiskový modul pružnosti EIT.

Z naměřených výsledků mikrotvrdosti je zjevné, že se vtiskový modul pružnosti u zatížení 1 a 5 N výrazně neliší. Největší vtiskový modul pružnosti nastal u ozáření 198 kGy při zatížení 5 N. Nejmenší hodnota byla naměřena při neozářeném PA66 při zatížení 1 N. Nárůst mezi největší a nejmenší hodnotou je téměř 20 %.



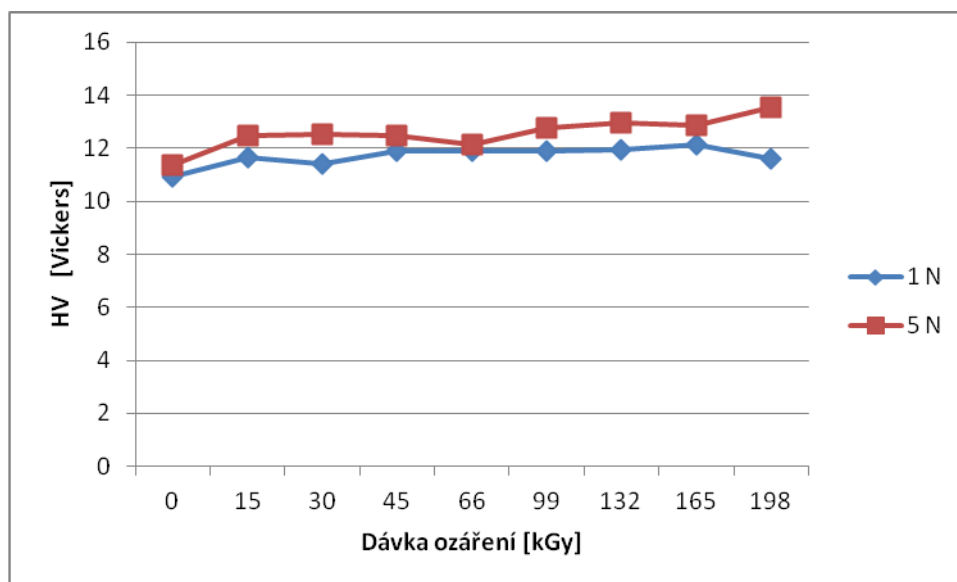
Obr. 49. Redukovaný modul tiskového kontaktu ER.

Při hodnocení mikrotvrdosti byl naměřen nárůst mezi nejmenší a největší hodnotou 19,7 %. Nejvyšší naměřená hodnota byla při ozáření 198 kGy při zatížení 5 N. Naopak nejmenší hodnota byla zjištěna u neozářeného PA66 při zatížení 1 N.



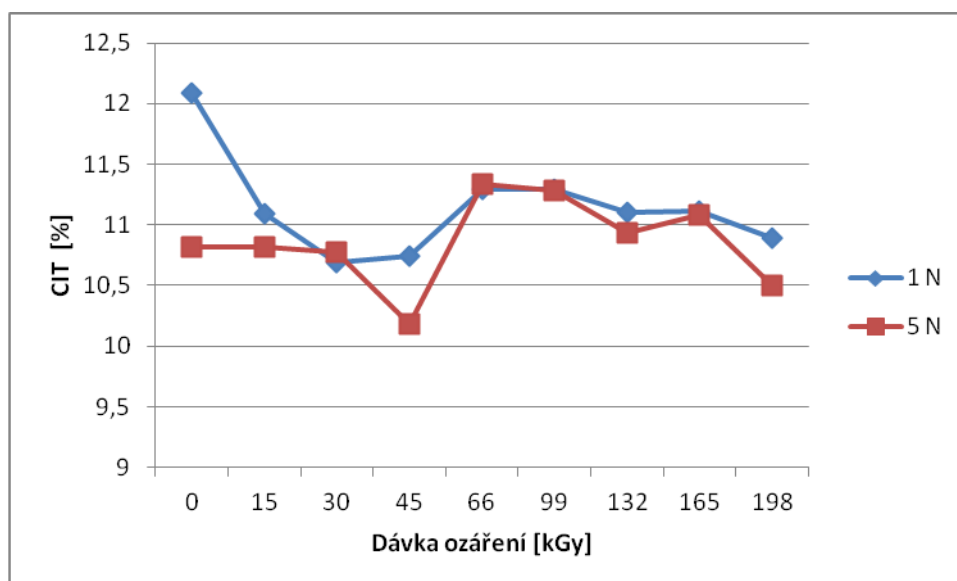
Obr. 50. Modul pružnosti E^* .

Jako v předešlých případech byla naměřena nejvyšší hodnota modulu pružnosti u PA66 při zatížení 5 N a dávce ozáření 198 kGy. Nejmenší hodnota byla zjištěna u neozářeného PA66 při zatížení 1N. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou při zatížení 1 N a 5 N byl zjištěn 20 %.



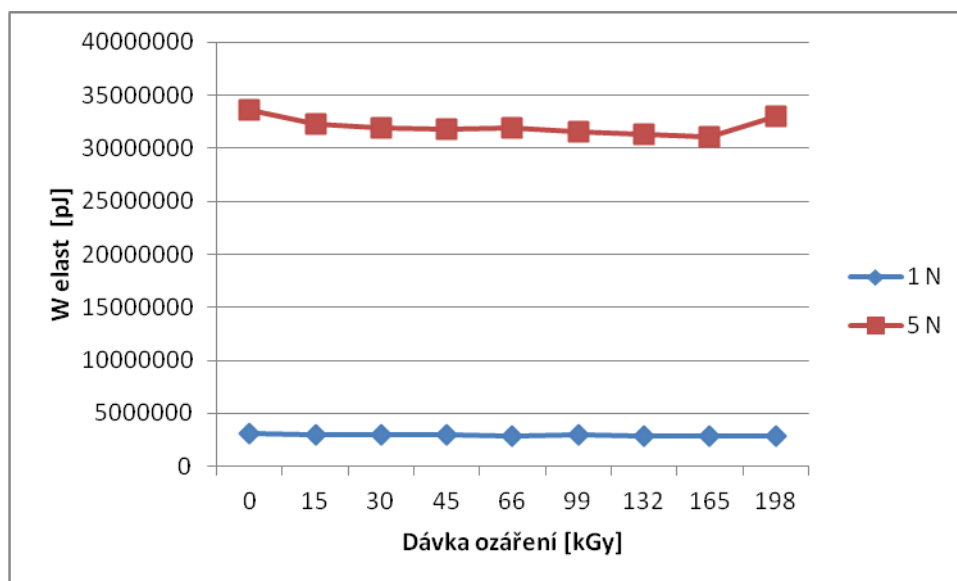
Obr. 51. Tvrdost podle Vickerse HV .

Z výsledků instrumentované zkoušky tvrdosti je opět patrné, že nejvyšší hodnota tvrdosti dle Vickerse byla naměřena při zatížení 5 N a dávce ozáření 198 kGy. Nejmenší tvrdost dle Vickerse byla naměřena při zatížení 1 N u neozářeného PA66. Rozdíl mezi dávkou ozáření 198 kGy a neozářeným PA66 je 19 %.



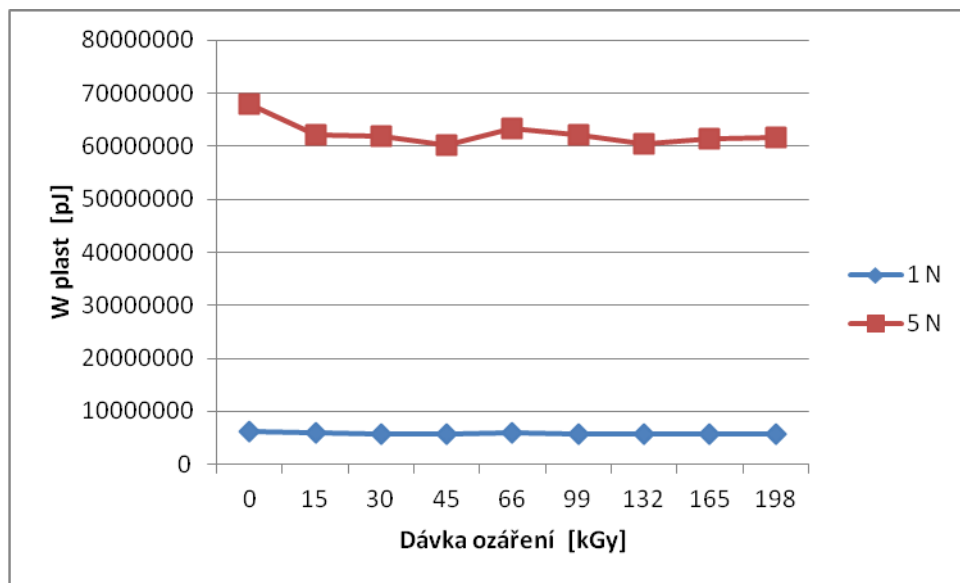
Obr. 52. Vtiskové tečení CIT.

Při zkoušce mikrotvrdomosti bylo naměřeno největší vtiskové tečení u neozařeného PA66 při zatížení 1 N. Naopak nejmenší hodnota byla zjištěna při zatížení 5 N u dávky ozáření 45 kGy. Navýšení mezi nejmenší a největší hodnotou mezi ozářeními činí 15,9 %.



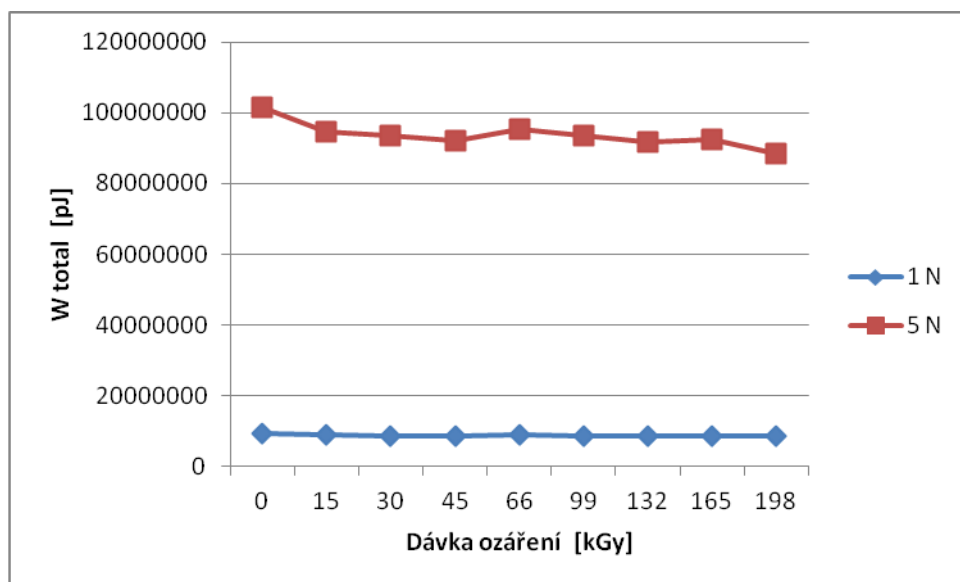
Obr. 53. Pružná deformační práce vnikacího procesu W_{elast} .

Z naměřených dat je patrné, že se hodnoty při zatížení 1 a 5 N od sebe hodně liší. Největší hodnota pružné deformační práce byla naměřena při zatížení 5 N u neozařeného PA66. Zato nejmenší hodnota W_{elast} byla naměřena při zatížení 1 N u dávky ozáření 165 kGy.



Obr. 54. Plastická deformační práce W_{plast} .

Z výsledků zkoušky mikrotvrdomosti je zřejmé, že největší hodnota plastické deformační práce byla naměřena při zatížení 5 N u neozářeného PA66. Nejmenší hodnota W_{plast} byla stejně jako u W_{elast} naměřena při zatížení 1 N a dávce ozáření 165 kGy.



Obr. 55. Celková deformační práce vnikacího procesu W_{total} .

Při zkoušce mikrotvrdomosti byla naměřena největší hodnota celkové deformační práce vnikacího procesu u zatížení 5 N a dávce ozáření 0 kGy. Naopak nejmenší hodnota byla vyhodnocena u zatížení 1 N a dávce ozáření 165 kGy.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo měření mikrotvrlosti vybraného modifikovaného materiálu PA66 při dávkách ozáření 0, 33, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy s přidáním 5 objemových % síťujícího činidla. V teoretické části jsem se zabýval zkouškami tvrdosti a síťováním polymerů. V praktické části probíhalo měření mikrotvrlosti modifikovaného PA66.

Měření bylo provedeno na Micro-Combi-Tester při dvou různých zatíženích 1 a 5N. Jako zkušební indenter byl použit Vickers. Na každém vzorku PA66 se provádělo maticovým způsobem 10 měření na různých místech. Naměřené výsledky byly zpracovány do tabulky a následně vyhodnoceny v grafech.

Z naměřených hodnot pro zatížení 1N vyplývá, že nejmenší vtisková tvrdost byla naměřena u neozářeného PA66. Vtisková tvrdost se zvětšovala při ozářených vzorcích a ta největší hodnota byla naměřena u dávky ozáření 165 kGy. Nárůst vtiskové tvrdosti mezi nejmenší a největší hodnotou je 10 %. Naopak pro celkovou deformační část práce vnikacího procesu byla naměřena nejmenší hodnota při ozáření 165 kGy a největší při neozářeném PA66. Z výsledků instrumentované zkoušky tvrdosti byla naměřena nejmenší hodnota tvrdosti dle Vickerse u neozářeného PA66. Zatímco největší hodnota tvrdosti dle Vickerse byla naměřena při dávce ozáření 165kGy.

Z hodnot při zatížení 5N je patrné, že nejmenší vtisková tvrdost byla stejně jako u zatížení 1N naměřena u neozářeného PA66. Největší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena při největší dávce ozáření a to 198 kGy. Navýšení vtiskové tvrdosti mezi neozářeným a PA66, který byl ozářen dávkou 198 kGy, činí 16 %. U celkové deformační práce vnikacího procesu byla naměřena největší hodnota u neozářeného PA66. Naopak nejmenší deformační práce byla naměřena při dávce ozáření 198 kGy. Stejně jako u zatížení 1N byla naměřena nejmenší hodnota tvrdosti dle Vickerse u neozářeného PA66. Naopak největší hodnota tvrdosti dle Vickerse byla naměřena při ozáření 198 kGy.

Z naměřených hodnot je zřejmé, že s rostoucí dávkou ozáření se zvětšuje mikrotvrlost daného PA66.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SCHATZ, Miroslav, VONDRÁČEK, Petr. *Zkoušení polymeru*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1979. 264 s.
- [2] DOLEŽAL, PAVEL., PACAL, BOHUMIL.,: *Hodnocení mikrotvrdosti struktury materiálů*. VUT Brno, 2006, 41 s.
- [3] Zkoušení materiálů a výrobků [online]. 2005 [cit. 2013-1-10]. Dělení metod určování tvrdosti. Dostupné z WWW:
<<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/2%20deleni%20metod%20urcovani%20tvrdosti.doc>>
- [4] ČSN EN ISO 14577-1. *Kovové materiály-instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů-Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 31s.
- [5] Zkoušení materiálů a výrobků [online]. 2005 Měření tvrdosti dle Brinella [cit. 2013-1-15]. Dostupné z WWW:
<<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/zkouska%20tvrdosti%20podle%20brinella.doc>>.
- [6] Zkoušení materiálů a výrobků [online]. 2005 Měření tvrdosti dle Rockwella [cit. 2013-1-15]. Dostupné z WWW:
<<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/zkouska%20tvrdosti%20podle%20rockwella.doc>>.
- [7] Zkoušení materiálů a výrobků [online]. 2005 Měření tvrdosti dle Vickerse [cit. 2013-1-15]. Dostupné z WWW:
<<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/zkouska%20tvrdosti%20podle%20vickerse.doc>>
- [8] RYBNIKÁŘ, František a kolektiv. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 420 s.
- [9] ČSN EN ISO 2039-1. *Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1 : Metoda vtláčením kuličky*. Praha : Český normalizační institut, 2003. 12 s.

- [10] TICHAVA, Miroslav. *Měření tvrdosti pryže a plastů v současném zkušebnictví: Technická zpráva VUGPT Zlín*. Zlín 1985 s 31-34
- [21] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. *Stojírenská technologie 1 - 1. díl: Nauka o materiálu*. 3. vyd. Praha: Scientia, 2002. 266 s.
- [12] ČSN EN ISO 2039-2. *Plasty-Stanovení tvrdosti-Část 2 :Tvrdost dle Rockwella*. Praha :Český normalizační institut,2000. 12 s.
- [33] PTÁČEK, Ludvík a kolektiv. *Nauka o materiálu*. 2. vyd. Brno: CERM-akademické nakladatelství. 520 s.
- [14] Současné trendy v metodách měření [online]. 2010 Měření tvrdosti dle Berkovich [cit.2013-1-17].Dostupné z WWW :
<http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27918>.
- [15] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery výroba,vlastnosti,zpracování,použití*. 2.vydání. Praha: Vysoká škola chemická, 2006. 280 s
- [46] Fotovoltaika [online]. 2009 Způsoby síťování [cit. 2013-1-20]. Dostupné z WWW:
<http://data.kabex.quonia.cz/Onas/fotovoltaika_ES-4-09.pdf>
- [57] HOLMES-SIEDLE, A. G., ADAMS L.: *Handbook of Radiation effects – sekond edition*, Oxford, Oxford University Press, 2002. 612 s.
- [18] Beta a gamma záření [online]. 2013 Způsoby síťování [cit. 2013-1-20]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Beta_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD>
< http://cs.wikipedia.org/wiki/Gama_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD>
- [19] *BGS -Beta-Gamma-Service*. [online].[cit.2013-1-21]. Dostupný z WWW:
<<http://www.bgs.de>>
- [20] MLEZIVA, Josef. *Polymery struktura,vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993,525 s

- [21] Plastové součástky [online].Polyamid 66 [cit. 2013-1-31]. Dostupné z WWW: <<http://www.resinex.cz/produkty/technyl-star.html>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_p	Průmět kontaktní plochy
C	Kontaktní poddajnost
CIT	Identační creep [%]
ČSN	Česká státní norma.
D	Průměr vnikající kuličky
d	Průměr vtisku
d_1	Délka úhlopříčky
d_2	Délka úhlopříčky
$d_{1,2}$	Aritmetický průměr úhlopříček
e	Hloubka vtlačení po odstranění přídavného zatížení
EIT	Vtiskový modul pružnosti
E_r	Redukovaný modul tiskového kontaktu
E^*	Modul pružnosti
F	Zkušební zatížení
F_0	Počáteční zatížení
F_1	Přídavné zatížení
F_{max}	Maximální zkušební zatížení
h	Hloubka vtisku
HB	Tvrdost dle Brinella
HR	Tvrdost dle Rockwella
HV	Tvrdost dle Vickerse
HIT	Vtisková tvrdost
HK	Tvrdost dle Knoop
H_{CH}	Tvrdost dle Berkovice

kGy	Jednotka ozáření
mm	Jednotka délky
n	Počet měření
PA66	Polyamid 66
P_d	Hloubka vtisku
RIT	Relaxace
S	Plocha vtisku
t	Čas
W	Deformační práce vnikajícího procesu
\bar{x}	Aritmetický průměr

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Identificační křivka. [4].....</i>	15
<i>Obr. 2. Obecné schéma Brinellovy zkoušky. [5].....</i>	16
<i>Obr. 3. Průběh zkušebního zatížení – metoda Brinell. [10].....</i>	19
<i>Obr. 4. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Brinella. [11].....</i>	19
<i>Obr. 5. Obecné schéma Rockwellovy zkoušky. [6]</i>	20
<i>Obr. 6. Průběh zatížení u zkoušky podle Rockwella. [10].....</i>	22
<i>Obr. 7. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Rockwella. [11].....</i>	22
<i>Obr. 8. Obecné schéma Vickersovy zkoušky. [7]</i>	23
<i>Obr. 9. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Vickerse. [11]</i>	25
<i>Obr. 10. Průběh zatížení u zkoušky podle Knoop. [2]</i>	25
<i>Obr. 11. Berkovichův indentor. [14].....</i>	27
<i>Obr. 12. Záření beta. [18]</i>	30
<i>Obr. 13. Záření gama. [18]</i>	30
<i>Obr. 14. Záření beta. [19]</i>	31
<i>Obr. 15. Záření gama. [19]</i>	31
<i>Obr. 16. Radiačně síťované polymery. [19]</i>	32
<i>Obr. 17. Rozměry zkoušeného vzorku PA66.</i>	38
<i>Obr. 18. Znárodnění vtiskového tečení. [4]</i>	42
<i>Obr. 19. Plastická a elastická deformační práce. [4]</i>	43
<i>Obr. 20. Vickersův indentor.</i>	44
<i>Obr. 21. Zatížení 1N pro neozářený PA66.</i>	45
<i>Obr. 22. Zatížení 1N pro dávku ozáření 165 kGy.</i>	45
<i>Obr. 23. Zatížení 5N pro neozářený PA66.</i>	46
<i>Obr. 24. Zatížení 5N pro dávku ozáření 165 kGy.</i>	46
<i>Obr. 25. Zatížení 1N pro neozářený PA66.</i>	47
<i>Obr. 26. Zatížení 1N pro dávku ozáření 165 kGy.</i>	47
<i>Obr. 27. Zatížení 5N pro neozářený PA66.</i>	48
<i>Obr. 28. Zatížení 5N pro dávku ozáření 165 kGy.</i>	48
<i>Obr. 29. Vtisková tvrdost HIT PA66.</i>	49
<i>Obr. 30. Vtiskový modul pružnosti EIT PA66.</i>	50
<i>Obr. 31. Redukovaný modul tiskového kontaktu ER PA66.</i>	50

<i>Obr. 32. Modul pružnosti E^* PA66.</i>	51
<i>Obr. 33. Tvrdost podle Vickerse HV PA66.</i>	51
<i>Obr. 34. Vtiskové tečení CIT PA66.</i>	52
<i>Obr. 35. Pružná deformační práce vnikacího procesu PA66.</i>	53
<i>Obr. 36. Plastická deformační práce W_{plast} PA66.</i>	53
<i>Obr. 37. Celková deformační práce vnikacího procesu W_{total} PA66.</i>	54
<i>Obr. 38. Vtisková tvrdost HIT PA66.</i>	55
<i>Obr. 39. Vtiskový modul pružnosti EIT PA66.</i>	55
<i>Obr. 40. Redukovaný modul tiskového kontaktu ER PA66.</i>	56
<i>Obr. 41. Modul pružnosti E^* PA66.</i>	56
<i>Obr. 42. Tvrdost podle Vickerse HV PA66.</i>	57
<i>Obr. 43. Vtiskové tečení CIT PA66.</i>	57
<i>Obr. 44. Pružná deformační práce vnikacího procesu PA66.</i>	58
<i>Obr. 45. Plastická deformační práce W_{plast} PA66.</i>	59
<i>Obr. 46. Celková deformační práce vnikacího procesu W_{total} PA66.</i>	59
<i>Obr. 47. Vtisková tvrdost HIT.</i>	60
<i>Obr. 48. Vtiskový modul pružnosti EIT.</i>	60
<i>Obr. 49. Redukovaný modul tiskového kontaktu ER.</i>	61
<i>Obr. 50. Modul pružnosti E^*.</i>	62
<i>Obr. 51. Tvrdost podle Vickerse HV.</i>	62
<i>Obr. 52. Vtiskové tečení CIT.</i>	63
<i>Obr. 53. Pružná deformační práce vnikacího procesu W_{elast}.</i>	63
<i>Obr. 54. Plastická deformační práce W_{plast}.</i>	64
<i>Obr. 55. Celková deformační práce vnikacího procesu W_{total}.</i>	64

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Průměr kuličky, zkušební zatížení a doba odečítání. [9].....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2. Zatížení a průměry kuliček u metody Rockwell. [12].....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 3. Metoda dle Vickerse se podle zatížení dělí na tři skupiny. [8].....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 4. Vliv poměru skupin –CONH- a –CH₂- na vlastnosti polyamidů. [20].....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5. Vstřikovací parametry PA 66.</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6. Hodnoty PA 66 při zatížení 1 N.</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 7. Hodnoty PA66 při zatížení 1 N.</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 8. Hodnoty PA66 při zatížení 5 N.</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 9. Hodnoty PA66 při zatížení 5 N.</i>	<i>58</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PI CD-Rom