

Měření tvrdosti vybraných polyamidů

Adéla Hořáková

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Adéla Hořáková**

Osobní číslo: **T11232**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření tvrdosti vybraných polyamidů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava zkušebních těles pro experiment.
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:

doc. Ing. David Mañas, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

10. února 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


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 užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 23.5.2014


.....

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

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

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

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

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

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce bylo měření tvrdosti modifikovaných polymerních materiálů v oblasti makro a mikro tvrdosti. Vybrané byly polymerní materiály - neplněný polyamid 6 a plněný polyamid 66 30 % skelných vláken. Testovaná zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 470C. Zkušební tělesa byla následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66 a 99 kGy. Měření mikrotvrdosti proběhlo na mikrotvrdoměru Micro-Combi testeru a měření makrotvrdosti bylo realizováno na tvrdoměru OMAG metodami Shore A a Shore D. Výsledky měření ukázaly zlepšení mikromechanických vlastností v průměru o 60 %.

Klíčová slova: polyamid 6, polyamid 66 30%GF, mikrotvrdost, tvrdost, beta záření

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis was to measure the hardness of modified polymer materials in the field of macro and micro hardness. Were selected polymeric materials - unfilled polyamide 6 and polyamide 66 filled with 30 % glass fibers. Test testing specimens were produced by using injection molding on injection molding machine ARBURG ALLROUNDER 470C. The test specimens were then irradiated with beta radiation in doses of 0,33,66 and 99 kGy. Microhardness was on microhardness tester Micro-Combi and macrohardness measurements were carried on hardness tester OMAG methods Shore A and Shore D. The measurement results showed improvement micromechanical properties of an average of 60 %.

Keywords: Polyamide 6, Polyamide 6.6 30% GF, microhardness, hardness, beta irradiation

Ráda bych poděkovala doc. Ing. Davidu Maňasovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a pomoc, kterou mi věnoval při vypracovávání bakalářské práce.

Motto

„S pomocí knih se mnozí stávají učenými i mimo školu. Bez knih pak nebývá učený nikdo ani ve škole.”

Jan Amos Komenský

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

Ve Zlíně 23.5.2014

.....
Podpis

OBSAH

Úvod	10
I. Teoretická část	12
1.1 Příprava vzorků	12
1.1.1 Příprava vzorků z termoplastů	14
1.1.3 Kondicionování	14
1.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella	15
1.2.1 Princip zkoušky	15
1.2.2 Zkušební zařízení	17
1.2.3 Provedení zkoušky	17
1.2.4 Zkušební vzorek	18
1.2.5 Možné chyby při měření	18
1.3 Měření tvrdosti podle Vickerse	18
1.3.1 Princip zkoušky	18
1.3.2 Zkušební zařízení	19
1.3.3 Provedení zkoušky	19
1.3.4 Zkušební vzorek	20
1.3.5 Možné chyby při měření	20
1.4 Měření tvrdosti podle Rockwella	21
1.4.1 Princip zkoušky	21
1.4.2 Zkušební zařízení	21
1.4.3 Provedení zkoušky	22
1.4.4 Zkušební vzorek	23
1.4.5 Možné chyby při měření	23
1.5 Měření tvrdosti podle Shore	24
1.5.1 Princip zkoušky	24
1.5.2 Zkušební zařízení	25
1.5.3 Provedení zkoušky	26
1.5.4 Zkušební vzorek	27
1.6 Metoda IRHD	27
1.6.1 Princip zkoušky	27
1.6.2 Zkušební zařízení	28
1.6.3 Provedení zkoušky	29
1.6.4 Zkušební vzorek	29
1.7 Metody měření tvrdosti pro měkké materiály	30
1.7.1 Tvrdost podle DVM	30
1.7.2 Tvrdost podle Mohse	30
II. Praktická část	32
2 Experimentální část	33
2.1 Určování tvrdosti	33
2.1.1 Vyhodnocení tvrdosti	34
2.2 Měření tvrdosti	35
2.2.1 Měření tvrdosti u polyamidu 6	35
2.2.1.1 Měření tvrdosti metodou Shore A u polyamidu 6	35
2.2.1.2 Měření tvrdosti metodou Shore D u polyamidu 6	36
2.2.1.3 Měření mikrotvrdosti u polyamidu 6	37
2.2.2 Měření tvrdosti u polyamidu 66 plněného 30 % skelných vláken	38
2.2.2.1 Měření tvrdosti metodou Shore A u polyamidu 66	38
2.2.2.2 Měření tvrdosti metodou Shore D u polyamidu 66	39

2.2.2.3 Měření mikrotvrdosti u polyamidu 66	40
3 Diskuze výsledků	42
3.1 Měření tvrdosti u polyamidu 6	42
3.2 Měření tvrdosti u polyamidu 66 plněného 30 % skelných vláken	45
Závěr	48
Seznam použité literatury	49
Seznam použitých symbol a zkratek	50
Seznam obrázků	51
Seznam tabulek	52

ÚVOD

Bakalářská práce řeší problém měření tvrdosti u polyamidů. Tvrdost je vlastně odolnost materiálu proti vnikání tvrdšího tělesa, neboli indentoru, který musí mít přesné rozměry a s daným zatížením. Tyto hodnoty a také další potřebné informace jsou vždy uvedené v normě ke každé zkoušce. Hodnoty tvrdosti můžeme odvozovat z hloubky vtisku, průměru vtisku, úhlopříčky vtisku aj. Výsledné hodnoty tvrdosti jsou závislé na době působení indentoru, jeho vlastnostech a rozměrech, celkové velikosti zatížení a jiných vlastnostech.

Cílem této bakalářské práce je nejprve se seznámit s několika metodami měření tvrdosti a následně vybrané metody aplikovat na vybrané druhy polymerů. Teoretická část je zaměřena na vybrané metody měření tvrdosti. Také na seznámení se s postupy měření, použitými zařízeními a dalšími specifikacemi použitých zařízení. Praktická část zpracovává naměřené hodnoty u polyamidu 6 a polyamidu 66 plněného 30 % skelných vláken. Oba materiály byly měřeny metodami Shore A, Shore D a mikrotvrdostí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Tvrdot je jednou z charakteristických veličin polymerních materiálů. Oproti kovům je zde rozdíl v tom, že polymery jsou houževnaté a někdy i pružné. Nelze proto stanovit jednotnou metodu pro všechny materiály. [2]

Tvrdot definujeme jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Na této definici je založena většina přístrojů k měření tvrdosti. Hodnoty tvrdosti se uvádějí bez jednotek, nebo s jednotkou N/mm^2 . Protože však tento způsob může vést k omylům, je lepší uvádět tvrdost jako číslo nepojmenované, pouze s udáním způsobu měření nebo stupnice. Pro tvrdost používáme značku H. [4]

Z celé řady existujících metod se používá pro plasty pěti vtiskových metod podle Brinella, Vickerse, Rockwella, zkoseným kuzelem a podle Shora. Jiné metody obvyklé ve strojírenství se v plastikářském oboru neuplatnily. [1]

1.1 Příprava vzorků

Zkušební tělesa se připravují dvojitým způsobem:

- Přímou ze zkoušených materiálů jejich vulkanizací, lisováním, vstříkáním či vytvářením v příslušných formách s tvarem zkušebního tělesa nebo vzorku, ze kterého se dále vysekává zkušební těleso.
- Zkušební tělesa se připravují z hotových výrobků nebo polotovarů vysekáváním, vyřezáváním nebo obráběním.

Často se srovnávají vlastnosti zkušebních těles připravených oběma způsoby, aby byly získány vzájemné vztahy mezi podmínkami, ze kterých jsou polymery zpracovány v laboratoři a ve výrobě. V laboratoři jsou podmínky modelovány hlavně z hlediska reprodukovatelnosti za zcela jiných tepelných a tlakových podmínek než ve výrobě. Při rozdílnosti vlastností je nutno brát v úvahu vliv tepelného přestupu objemu, síťovacích systémů, podmínek chlazení apod. [5]

1.1.1 Příprava vzorků z termoplastů

Termoplasty se zpracovávají převážně vstříkáním, válcováním, vytlačováním nebo lisováním. Příprava zkušebních těles je zpravidla stejná. Při vstříkání a lisování se připravují v konečném tvaru, u ostatních procesů se získají desky, tyče, trubky, z nichž se

zhotovují zkušební tělesa strojním obráběním nebo na speciálních frézovacích kopírovacích strojích.

Pro každý typ polymeru je nutný určitý vstřikovací cyklus, který zahrnuje uzavření formy, plnění formy, tuhnutí taveniny a vyprazdňování formy. Jsou dány teploty taveniny a formy, tlaky a způsoby jejich kontroly. Vlastnosti polymerního vzorku jsou závislé na vzniklé struktuře, kterou ovlivňuje charakter toku při vstřikování a pak hlavně rychlost ochlazování.

Při rychlém ochlazení se získá u krystalických polymerů výlisek s převážně amorfni strukturou na povrchu. Směrem do středu přibývá krystalických center a ve středu zvláště u objemových výlisků jsou již dobře vyvinuté sférolity. Krystalické oblasti nejsou tedy dobře a jejich další uspořádání závisí na teplotě, vlhkosti a čase. Výlisek mění své vlastnosti ještě dlouho po vyjmutí z formy a je v nerovnovážném stavu. Navenek se to projeví tím, že rychle ztvdne nejdříve na chladné formě vnější vrstva. Dalším ochlazováním pak tuhnou i vnitřní vrstvy, které se snaží vyrovnat teplotní roztažnost smršťováním, čemuž zabraňují ztuhlé vnější vrstvy. Vzniká pak vnitřní napětí, které lze někdy zmírnit tepelnou stabilizací, ale zcela odstranit se nedá.

Tavenina vstříkнутá do temperované formy se ochlazuje pomalu, vytváří se velké množství homogenně rozložených krystalických center, které rychle narůstají. Výlisek je pak v převážně krystalickém stavu, kde se rovnovážného stavu docílí kondicionováním. Rozměry výlisku se pak shodují s formou, protože až do posledního okamžiku působí tlak, doplňuje se tavenina a vyrovnává se objem vzniklý smrštěním, vlivem krystalizace a ochlazování.

Všechna zkušební tělesa se před zkoušením podrobují vnější prohlídce. Zjišťují se vzduchové bublinky, povrchové trhlinky, vrásky, cizí tělesa zalisované v povrchu, mechanické poškození, nedolisky, vrstevnatost, homogennost v barvě apod. Za účelem zjištění homogenity se vzorky i řežou. Tvar zkušební tělesa (dán normou) musí být přesně dodržen. Musí mít podélnou přímkovou osu, ostré, rovnoběžné hrany a rovné stěny. Válcovitá tělesa musí být kruhového průřezu. Tělesa tvaru destiček musí mít v celé délce stejnou tloušťku, ostré a přímé rovnoběžné hrany. Vadné tělesa se vyřazují. [5]

1.1.2 Příprava vzorků z reaktoplastů

Reaktoplasty se zpracovávají převážně vysokotlakým lisováním, s výjimkou pryskyřic tvrditelných za normální teploty a bez tlaku jako jsou epoxidové a polyesterové pryskyřice, které se odlévají a dodatečně dotvrzují ve vyhřívaných formách.

U teplem tvrditelných termoreaktivních pryskyřic, které jsou většinou směsí pryskyřice a pojiva, dochází při ohřátí k anizotropnímu rozložení pojiva, pryskyřice se taví a přechází z vnitřních vrstev směrem k teplému povrchu. Povrch je lesklý, téměř čistá pryskyřice, zatímco vnitřní vrstvy mají jiné složení.

Při lisování se vyhřívá obvykle spodní část formy, kam se klade nálož a pak se teprve zalisovává patricí. Při vyjímání se opět zvedne dříve, než se vylisované tělíčko vyjme. Bude proto tepelná historie dolní plochy jiná než horní a je proto nutno plochy označit. Při stanovení např. tvrdosti je to důležité.

Příprava zkušebních těles z polotovarů nebo hotových výrobků vyřezáváním, frézováním, broušením a leštěním má také svá pravidla. Musíme vědět, jak byl materiál připraven a zohledňovat směrové efekty, které vznikají při kalandrování, vytlačování a jiných procesech.

Z desek a fólií se vzorky vyřezávají nebo vysekávají tvarovými noži. Vyřezávací a vysekávací zařízení se musí uzpůsobit na tažný řez nebo výsek. Přesné podmínky a způsob provádění uvádí vždy příslušná zkušební norma. [5]

1.1.3 Kondicionování

V zásadě platí, že zkušební tělesa, která podrobíme fyzikálně mechanickým zkouškám, nesmí být předem vystavena mechanickému, fyzikálně chemickému nebo tepelnému namáhání, které by mohlo výsledky zkoušek ovlivnit.

Většina zkušebních vzorků a materiálů prošla tepelným namáháním. I vzorky připravené obráběním a broušením se povrchově zahřívají. Před provedením vlastní zkoušky je nutné materiál nechat odležet, až dosáhne rovnovážného stavu, hlavně z hlediska teploty a vzdušné vlhkosti. Všechny faktory, které ovlivňují při přípravě stav polymerního materiálu, tvoří tzv. historii vzorku, která se má kondicionováním vyrovnat, aby se co nejméně podílela na výsledcích měření.

Kondicionování spočívá v tom, že se vzorky nechají určitou dobu odležet v klimatizovaných prostorách za podmínek smluvní teploty a relativní vlhkosti. Vzorky přejímají teplotu okolního vzduchu, vlhkost se vyrovnává, přičemž doba kondicionování je závislá na teplotě, při které byl vzorek připraven, tloušťce vzorku, tepelné vodivosti a difúzních vlastnostech hmoty. [5]

Doba kondicionování musí být předepsána v normě pro daný materiál. Není-li v příslušné normě doba kondicionování stanovena, pak se použijí následující doby:

a, pokud není specifikováno jinak: minimálně 88h pro standardní prostředí 23/50 a 27/65.

b, pokud není specifikováno jinak: minimálně 4h pro teplotu okolí od 18°C do 28°C.

Pokud není uvedeno jinak, musí být zkušební vzorky zkoušeny ve stejném prostředí nebo při stejné teplotě, při níž byly kondicionovány. V každém případě musí být zkouška provedena bezprostředně po vyjmutí zkušebních vzorků z prostoru kondicionování. [7]

1.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Autorem této zkoušky je švédský inženýr Johan August Brinell. Svoji metodu měření tvrdosti poprvé představil na druhém mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálů v Paříži v roce 1900. Jeho zkouška se ujala velmi rychle a i přes své některé nedostatky je využívána dodnes. [3]

Metoda je založena na principu vtlačování kuličky do zkoušeného materiálu. Tvrdost se vyjadřuje vztahem mezi silou, kterou se vtlačuje ocelová kulička do zkoušeného materiálu a velikostí vtisku, který po určité době působení na zkušebním tělese vznikne. I když tato metoda je používána pro hodnocení plastů, byla odvozena z metody hodnocení kovů. Výsledky však nelze vzájemně porovnávat. Po odtížení kuličky zůstane část měřené látky nevratně deformována. [2]

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

Kde F je zkušební síla v N

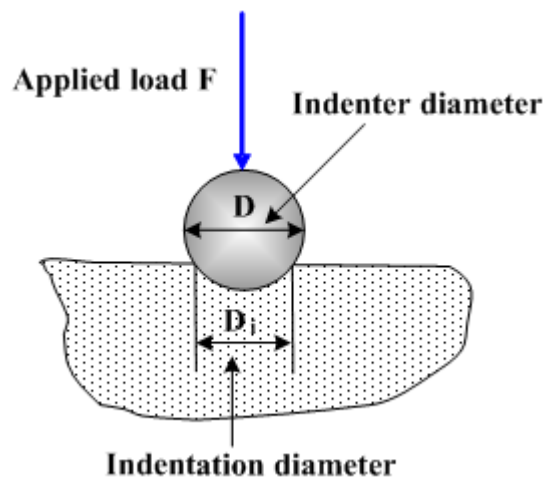
d je průměr vtisku v mm

D je průměr kuličky v mm [6]

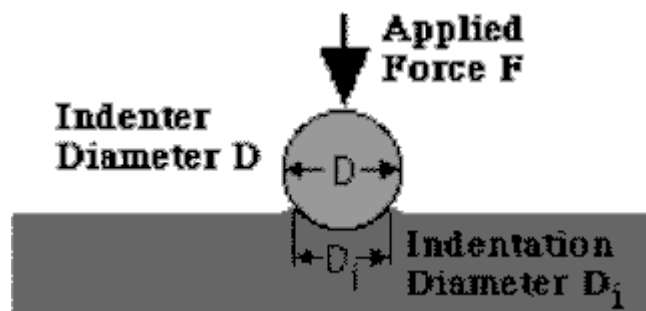
1.2.1 Princip zkoušky

Zkouška spočívá ve vtlačování vnikacího tělesa- indentoru (ocelové kuličky nebo kuličky z tvrdokovu o průměru D) do povrchu materiálu a změření průměru vtisku d , který zůstane na povrchu po odlehčení zkušebního zatížení. Ocelová kulička se používá pro materiály s tvrdostí podle Brinella do 450HB. Na obrázku č. 1 je nakreslen ideální stav vtlačení kuličky do zkušebního materiálu, kdy nedojde k deformaci materiálu v okolí kuličky a skutečný průběh vtlačení zkušebního tělíska do vzorku je zobrazen na obrázku č. 2. Při reálním průběhu vtlačení kuličky do vzorku dojde k vytlačení okolního materiálu kolem kuličky a při hodnocení se tento jen zahrnuje. [2]

Kulička z tvrdokovu se používá pro materiály s tvrdostí podle Brinella do 650HB. Hodnoty tvrdosti získané použitím ocelové kuličky a kuličky z tvrdokovu se podstatně liší při tvrdostech nad 350 HB. [6]



Obr. 1 Ideální průběh vtisku [13]



Obr. 2 Skutečný průběh vtisku [14]

1.2.2 Zkušební zařízení

Nejdůležitějším zařízením pro tuto zkoušku je tvrdoměr. Ten se skládá z rámu s nastavitelnou základnou, která je opatřena deskou pro uložení zkušební tělesa, měřicí kuličky s příslušnými nastavci a zařízením pro aplikaci zatížení bez rázu.

Tvrdoměr musí být vybaven zařízením pro měření hloubky vtlačení měřicí kuličky v rozsahu 0,4 mm s přesností $\pm 0,005$ mm. Rám se nesmí při aplikaci maximálního napětí deformovat o více než 0,05 mm. Tato deformace se měří podél hlavní osy použité síly. Měřicí kulička je vyrobena z leštěné tvrzené oceli a po zkoušce nesmí vykazovat žádnou deformaci či poškození. K této zkoušce budeme také potřebovat stopky s přesností $\pm 0,1$ s. [9]

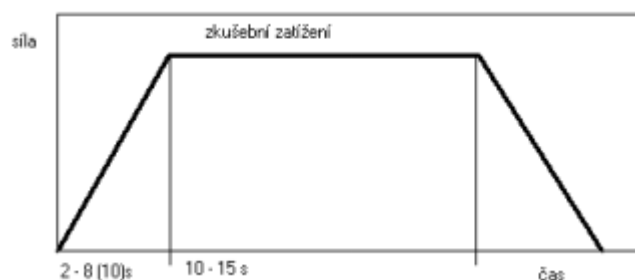
1.2.3 Provedení zkoušky

Zkouška se provádí obvykle při teplotě 10 až 35°C, v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Při zkoušce musí být použito zkušební zatížení odpovídající zkoušenému materiálu a velikosti kuličky. 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. Vnikací těleso se zatlačuje do povrchu materiálu zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázů a chvění. Doba od začátku zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2 s a delší než 8 s. Doba působení zkušební síly je v rozmezí 10 až 15 s. Pro některé materiály mohou být použity delší časy, ty však musí být dodržovány s tolerancí ± 2 s. [6]

Zkušební zatížení F_m se volí z hodnot: 49 N, 132 N, 358 N, 961 N tak, aby dosažená hloubka vtlačení h po opravě na deformaci rámu byla v rozsahu 0,15 mm až 0,35 mm.

Leží-li hodnoty hloubky vtlačení po 30 s mimo rozsah, změní se zkušební zatížení, aby se docílilo hloubky vtlačení v uvedeném rozsahu. Zaznamená se počet měření, při nichž nebylo dosaženo správné hloubky vtlačení.

Je-li v řadě měření nutné změnit zkušební zatížení, může rozdíl mezi hodnotami tvrdosti vyskytujícími se v přechodové oblasti mezi různými zkušebními zatíženími vést k obtížné interpretaci výsledků zkoušek. Zkouška se provádí na deset platných měření na jednom nebo více zkušebních tělesech. [9]



Obr. 3 Průběh zkušebního zatížení [15]

1.2.4 Zkušební vzorek

Zkouška se provádí na povrchu, který je rovný a hladký, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a hlavně bez jakýchkoliv mazadel. Povrch vzorku musí být co nejméně ovlivněn ohřevem nebo tvářením. Tloušťka vzorku musí být nejméně osminásobek hloubky vtisku h . Na protilehlém povrchu nesmí být patrné stopy deformace od vnikacího tělesa. [6]

1.2.5 Možné chyby při měření

Přesnost měření závisí na správném proměření vtisku. U Brinellovy zkoušky je toto proměření obtížné a nepřesné, což je její nevýhodou. Vtisk bývá někdy nezřetelný a nesouměrný. Na průměr vtisku má velký vliv i vtažení materiálu po kraji vtisku (u materiálu nezpevněného) nebo naopak vytačení obvodového valu (u materiálu zpevněného). Příčinou další chyby je deformace použité vlačované kuličky (je z kalené oceli). Pro materiály tvrdší než 400 HB není již ocelová kulička vhodná a používá se kuličky ze slinutých karbidů. [4]

1.3 Měření tvrdosti podle Vickerse

1.3.1 Princip zkoušky

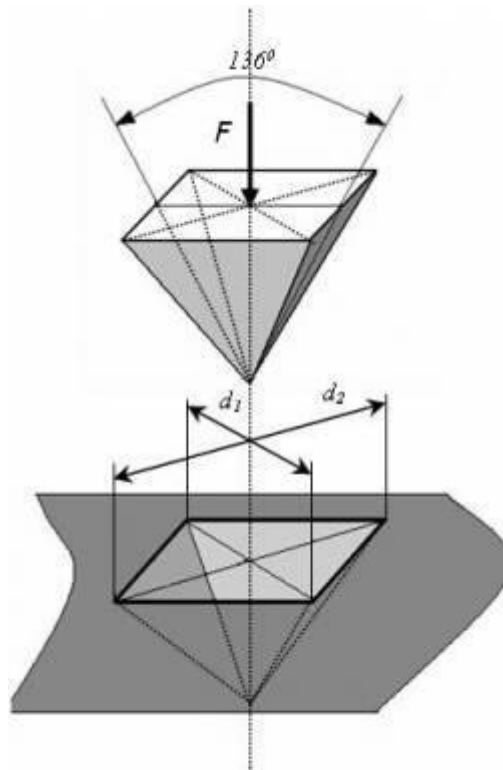
Princip Vickersovy metody je vtlačování čtyřbokého diamantového jehlanu do materiálu. Jehlan má vrcholový úhel 136° . Po odlehčení se měří úhlopříčka vtisku u , pomocí níž lze vypočítat povrch vtisku. Tvrdost podle Vickerse H_v se vyjádří poměrem zatížení P a plochy vtisku F . Plocha se stanoví ze vzorce:

$$F = \frac{u^2}{2\cos 22^\circ} = \frac{u^2}{1,8544} \quad [cm^2]$$

$$H_v = \frac{P}{F} = \frac{1,8544}{u^2} * P \quad [kpcm^{-2}]$$

Kde P je zatěžovací síla jehlanu [kp]
a u je úhlopříčka vtisku [mm]

Předností Vickersovy metody je, že můžeme použít různých zatížení, aniž se změní hodnoty tvrdosti. Pouze u malých zatížení jsou zjišťované hodnoty tvrdosti poněkud větší. [1]



Obr. 4 Vnikací těleso [15]

1.3.2 Zkušební zařízení

K této zkoušce potřebujeme zkušební stroj, který je schopný vyvinout předem stanovené zatížení nebo zatížení v požadovaném rozsahu. Pak také vnikací těleso, které je u této zkoušky ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu o čtvercové základně. [12]

1.3.3 Provedení zkoušky

Do materiálu vlačujeme diamantový jehlan se čtvercovou základnou. Poté okulárem mikroskopu nebo projekcí zjišťujeme střední délku u obou úhlopříček. Zkušební zatěžující síla je od 10 do 1000 N. Doba zatížení se volí od 10 do 180 s. Použité zatížení píšeme do označení, např. Hv 100. Pro praktickou potřebu používáme tabulek, ve kterých podle délky

uhlopříčky u a použité síly F najdeme přímo odpovídající tvrdost. Těto metody můžeme použít pro všechny tvrdosti. Je velmi přesná a není téměř závislá na zatížení.

Pro kontrolování tvrdosti po celou pracovní dobu se ve velkých závodech používá zdokonalených Vickersových tvrdoměrů, tzv. Diatestorů. Obraz čtvercového vtisku je promítán ve zvětšeném měřítku na matrici. To umožňuje pohodlné a rychlé čtení délky uhlopříčky u . [6]

Zkouška tvrdosti ^a		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Značka tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F N	Značka tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F N	Značka tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,490 3
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7

^a Lze použít nominální zkušební zatížení, které převyšuje 980,7 N.

Tab. 1 Doporučená zkušební zatížení [12]

1.3.4 Zkušební vzorek

Zkouška se provádí na povrchu, který je rovný a hladký, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména úplně bez mazadel. Konečná úprava povrchu musí umožnit přesné stanovení rozměrů uhlopříček vtisku. Příprava povrchu zkušebního tělesa se provádí tak, aby byla co nejvíce omezena změna jeho vlastností vyvolaná např. ohřevem nebo tvářením při řezání, broušení a leštění vzorku. Tloušťka vzorku musí být nejméně jeden a půl násobek délky uhlopříčky. Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace způsobené vnikacím tělesem. Při zkouškách na zakřivených površích (válcové, kulové) se používá opravných součinitelů. Součinitelé jsou uvedeni v příloze normy ČSN EN 6507-2. [6]

1.3.5 Možné chyby při měření

- Chyby způsobené odchylkou zatěžovací síly

Velikost chyby číselné hodnoty tvrdosti je lineárně přímo úměrná chybě zatěžovací síly, tzn. že odchylka síly +1 % vyvolá stejnou chybu hodnoty tvrdosti (+1 % HV).

- Odchylka od vrcholového úhlu stěn

Dovolená odchylka pro vrcholový úhel diamantového hrotu $\pm 0,5^\circ$ způsobí chybu v naměřené hodnotě tvrdosti $\pm 0,2\%$.

- Odchylka při měření délky úhlopříčky

Chyba měření délky úhlopříčky $+1\%$ způsobí chybu naměřené hodnoty tvrdosti -2% . Chyby vznikající při proměřování vtisku způsobují obvykle největší odchylky v hodnotě tvrdosti a relativní velikosti těchto chyb se zvětšují se zmenšováním velikosti vtisku. Dovolená odchylka měřícího zařízení tvrdoměrů je $\pm 1\mu\text{m}$ pro úhlopříčky o délce menší než $0,2\text{mm}$ a $\pm 0,5\%$ délky úhlopříčky pro délky větší než $0,2\text{mm}$.

- Chyby způsobené nedodržením předepsaných zkušebních podmínek

Do této skupiny lze zařadit chyby vznikající v důsledku např. rozdílné rychlosti přísunu vnikacího tělesa, rozdílné doby působení zatěžující síly, mechanickým zpevněním povrchové vrstvy, existencí povrchového napětí v místě zkoušky, aj. [6]

1.4 Měření tvrdosti podle Rockwella

1.4.1 Princip zkoušky

Kritériem pro stanovení tvrdosti u této metody není plocha vtisku, jako je tomu u Vickersovy metody, nýbrž hloubka vniku. Jde tedy také o princip vtlačování tělísek do zkoušeného materiálu. Pro měkké látky se používají ocelové kuličky o průměru $1,59\text{ mm}$ a pro tvrdé látky se používá diamantový kužel s vrchovým úhlem 120° . [2]

1.4.2 Zkušební zařízení

Zkušebním zařízením je standardní Rockwellův tvrdoměr, který se skládá z:

- tuhého rámu, který nese nastavitelný držák s kruhovou deskou o průměru min. 50 mm pro zkušební těleso
- měřící kuličky s příslušnými držáky
- zařízení pro aplikaci různých zatížení na měřící kuličku bez rázu

Měřící kulička se skládá z kuličky z leštěné oceli, která se volně pohybuje ve svém pouzdru. Kulička se nesmí během zkoušky deformovat nebo vykazovat po zkoušce poškození. Průměr kuličky závisí na použité Rockwellově stupnici. Měřící kulička je

spojena s číselníkovým úchylkoměrem nebo jiným vhodným zařízením pro měření hloubky vtlačení měřící kuličky s přesností na 0,001 mm. Je vhodné, ale nikoli nezbytné, aby byl úchylkoměr kalibrován v Rockwellově stupnici tvrdosti (1 dílek Rockwellovy stupnice = 0,002 mm). Je-li zařízení kalibrováno takto přímo, má úchylkoměr obvykle černou a červenou stupnici. Červená umožňuje automatické zařazení konstanty 130 pro odvození hodnoty tvrdosti dle Rockwella na stupnicích M, L a R. U Rockwellova tvrdoměru je předběžné zatížení obvykle aplikováno na zkušební vzorek pomocí stavěcí tyče, která zvedá desku nesoucí zkušební těleso, až se zkušební těleso dotkne měřící kuličky. V tomto uspořádání má číselníkový úchylkoměr znázorněn bod, který ukazuje, kdy bylo plně aplikováno předběžné zatížení. Velký význam má nastavení rychlosti aplikace zatížení. Tlumič Rockwellova tvrdoměru se nastaví tak, aby pracovní páka dokončila svou dráhu za 4 – 5 s, když v přístroji není zkušební těleso, nebo když není aplikováno zatížení měřící kuličkou na měřící kontakt. Přídavné zatížení pro tuto kalibraci musí být 980,7 N. [10]

1.4.3 Provedení zkoušky

Diamantový kužel nebo ocelovou kuličku, dotýkající se povrchu zkoušeného předmětu, nejprve předběžně zatížíme silou 100 N, což je výchozí poloha pro měření hloubky vtisku. Potom zvolna zvětšujeme zatěžovací sílu tak, abychom za 3 až 6 sekund dosáhli zatížení předepsané normou (např. předběžné zatížení silou 100 N + zkušební zatížení silou 1400 N = celkové zatížení silou 1500 N). Pak zatěžující sílu opět zmenšujeme až na 100 N a v tomto stavu zjistíme přírůstek h hloubky vtisku, který nastal proti výchozí poloze při 100 N. Většina přístrojů pro tuto zkoušku je upraveno tak, že hloubku vtisku odečteme na číselníkovém úchylkoměru, kde ukazatel na číselníku ukazuje přímo tvrdost podle Rockwella. Je to zkouška rychlá, snadná a vpichy jsou velmi malé (max. hloubka 0,2 mm). Je vhodná pro běžnou kontrolu velkosériových výrobků a tam, kde tvrdost podle Brinella již není použitelná. [4]

V praxi je hodnota tvrdosti dle Rockwella odvozena z následujícího vztahu

$$HR = 130 - e$$

Kde

HR je hodnota tvrdosti dle Rockwella

e je hloubka vtlačení po odstranění přídavného zatížení [mm]

Tento vztah platí pouze pro stupnice M, L, R a E. [12]

Pokud známe trvalou hloubku vtlačení h , pak hloubku vtlačení e vypočítáme ze vzorce

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

kde

h je trvalá hloubka vtlačení [mm] [2]

Stupnice tvrdosti dle Rockwella	Předběžné zatížení	Přídavné zatížení	Průměr měřicí kuličky
	N	N	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

Tab. 2 Hodnoty přídavných zatížení, předběžného zatížení a průměrů kuličky [12]

1.4.4 Zkušební vzorek

Zkouška se provádí na povrchu, který je rovný a hladký, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména úplně bez mazadel. Příprava povrchu zkušebního tělesa se provádí tak, aby byla co nejvíce omezena změna jeho vlastností vyvolaná např. ohřevem nebo tvářením při řezání, broušení a leštění vzorku. Tloušťka vzorku musí být nejméně deseti násobek hodnoty e . Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace způsobené vnikacím tělesem. Při zkouškách na vypouklých površích (válcové, kulové) se používá opravných součinitelů. V případě, že nejsou k dispozici opravné součinitele pro kulové a vyduté válcové plochy, musí být zkoušky na těchto plochách předmětem zvláštní dohody. Mimořádnou pozornost je třeba věnovat zkoušce na zaobleném povrchu. Vypuklá strana musí být obrácena ke vnikacímu tělesu. Jestliže je k vnikacímu tělesu obrácen vydutý povrch, může dojít k chybám v důsledku zploštění v podložce. [6]

1.4.5 Možné chyby při měření

- Chyby způsobené odchylkou zatěžovací síly

Chyba předběžného zatížení o velikosti +2 % vyvolá v závislosti na tvrdosti zkoušeného vzorku chybu hodnoty tvrdosti v rozmezí +0,1 až +0,3 %. Chyba celkového zatížení o ve-

likosti -1 % vyvolá v závislosti na tvrdosti zkoušeného vzorku chybu hodnoty tvrdosti v rozmezí +0,25 až +0,6 % u stupnice HRC, +0,45 až 1,2 % u stupnice HRB (velikost odchylky je nepřímo úměrná tvrdosti zkoušeného vzorku).

- Odchylka vrcholového úhlu kužele a odchylka průměru kuličky

Odchylka pro vrcholový úhel diamantového hrotu $+0,5^\circ$ způsobí chybu v naměřené hodnotě tvrdosti v rozmezí +0,2 až 0,8 % , odchylka průměru kuličky 1/16 palce o velikosti $+10\mu\text{m}$ způsobí odchylku v rozmezí +0,2 až +0,5 % (velikost odchylky je nepřímo úměrná tvrdosti zkoušeného vzorku).

- Chyby způsobené nedodržením předepsaných zkušebních podmínek

Do této skupiny lze zařadit chyby vznikající v důsledku např. rozdílné rychlosti vnikání, rozdílné doby působení zatěžující síly, nedostatečná úprava povrchu v místě zkoušky (drsnost) aj. [6]

1.5 Měření tvrdosti podle Shore

1.5.1 Princip zkoušky

Tato metoda patří mezi dynamické zkoušky tvrdosti. Její princip spočívá v pružném tělese o standardní hmotnosti, které dopadá z konstantní výšky na povrch. Při nárazu tělesa se malá část kinetické energie spotřebuje na nevratnou plastickou deformaci povrchu zkoušeného vzorku a zbývající energie se projeví odrazem tělesa. Z dosažené výšky po odrazu se vypočte hodnota tvrdosti, která ale u dynamických metod zkoušení tvrdosti nedosahuje přesností statických metod.

U původního Shoreho skleroskopu se pohybuje válcový čep ve skleněné trubce opatřené stupnicí, na které se odečte dosažená výška odrazu tělesa pomocí lupy. Nastavení počáteční výšky tělesa je možné buď vysátím vzduchu z prostoru nad tělesem pomocí gumového balónku, nebo pomocí pružiny.

Shoreho skleroskopy se používali především k měření tvrdosti válců do válcovacích stolic a používali se ve 2 stupnicích – HSC a HSD. Pádové těleso je válcového tvaru s diamantovým hrotem se zaoblením o poloměru 1 mm. [6]

Zkušební těleso musí být hladké, rovné a bez viditelných defektů. Velikost se musí volit tak, aby jednotlivá měření byla v místech vzdálených nejméně 12 mm od okraje a od sebe

vzdálených nejméně 5 mm. Tloušťka musí být nejméně 6 mm, při tvrdosti nad 50 Shore D může být 3 mm. [2]

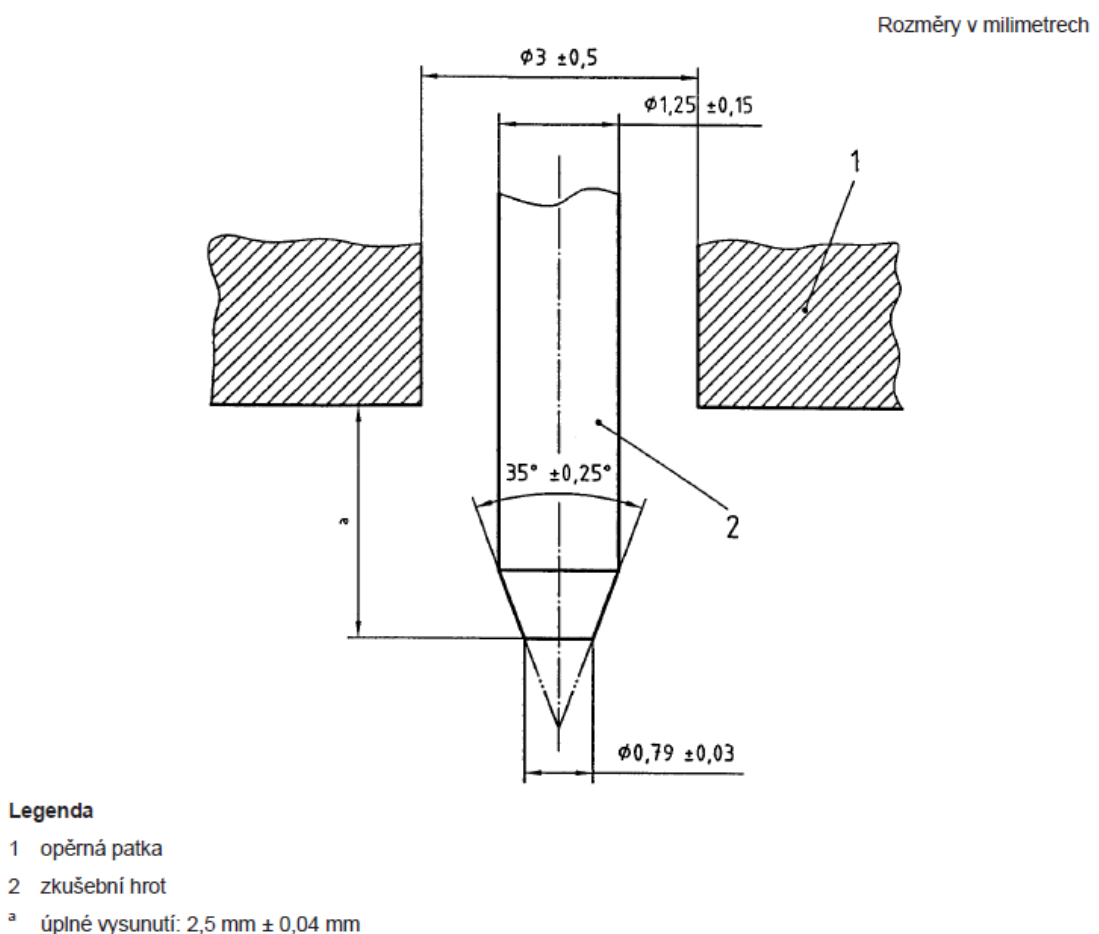
1.5.2 Zkušební zařízení

Použije se buď tvrdoměr typu A nebo D. Tvrdoměry se skládají z:

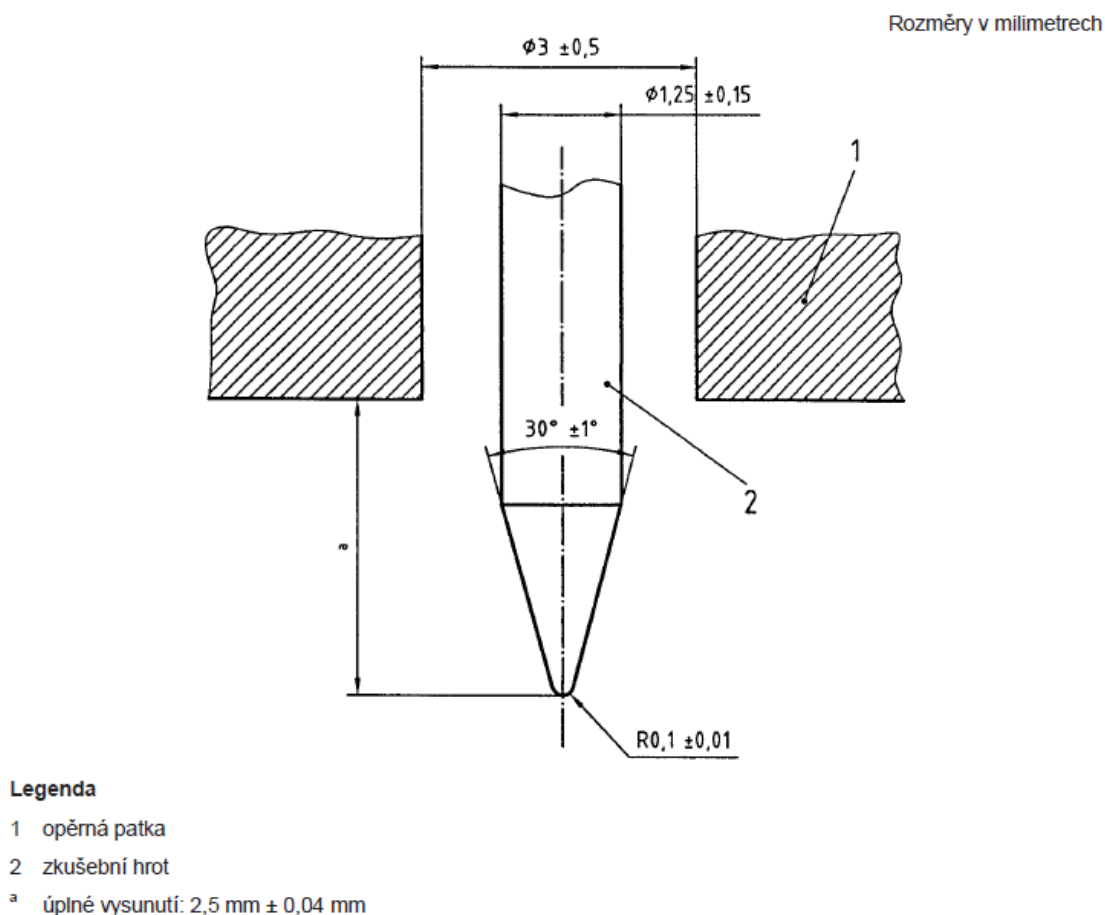
- opěrné patky s otvorem o průměru $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, vzdálenost středu otvoru od okraje patky je v kterémkoliv směru nejméně 6 mm.

- zkušebního hrotu vytvořeného na tyčince z kalené oceli o průměru $1,25 \text{ mm} \pm 0,15 \text{ mm}$.

[8]



Obr. 5 Zkušební hrot tvrdoměru typu A [8]



Obr.6 Zkušební hrot tvrdoměru typu D [8]

1.5.3 Provedení zkoušky

Při měření tvrdosti Shore A se postupuje tak, že se tvrdoměr přiloží na zkušební těleso (min. tloušťky 6 mm, nejméně 12 mm od okraje, při více měřeních nejméně 5 mm od sebe) tak, aby patka pevně přisedla na celé ploše. Tvrdost se odečítá za 3 vteřiny od okamžiku dotyku; mění-li se hodnota na stupnici i dále, pak se odečte tvrdost za 15 vteřin. Výsledná hodnota tvrdosti je aritmetický průměr nejméně tří měření a povolená odchylka od průměru nesmí být větší než $\pm 5\%$.

Při měření tvrdosti Shore D se postupuje obdobně jako u Shore A. Zkušební tělesa mají mít tloušťku nejméně 5 mm od sebe. Tloušťka při tvrdosti nad 50 Shore D může být i 3 mm. Hodnota tvrdosti se odečítá za 15 vteřin po přiložení tvrdoměru. Výsledkem zkoušky je průměr z 5 měření. [5]

1.5.4 Zkušební vzorek

tloušťka zkušebního vzorku musí být nejméně 4 mm. Zkušební vzorek je možné složit z několika tenčích vrstev, aby se dosáhlo požadované tloušťky. Avšak vzhledem k tomu, že nelze vždy docílit dokonalého kontaktu mezi jednotlivými vrstvami, nemusí se výsledky měření na vícevrstvých zkušebních tělesech shodovat s výsledky na zkušebních tělesech z jednoho kusu.

Zkušební vzorek musí být dostatečně velký, aby bylo možné provádět měření ve vzdálenosti nejméně 9 mm od kteréhokoliv okraje zkušebního tělesa, pokud není zjištěno, že stejných výsledků se docílí měřením v menší vzdálenosti od okraje. Povrch zkušebního vzorku musí být rovný na dostatečně velké ploše, aby se opěrná patka tvrdoměru dotýkala zkušebního vzorku na ploše o poloměru nejméně 6 mm od špičky zkušebního hrotu. Správná měření tvrdosti není možné provádět na zkušebních vzorcích se zaobleným, nerovným nebo drsným povrchem. [8]

1.6 Metoda IRHD

1.6.1 Princip zkoušky

Pro měření tvrdosti pryže se všeobecně ujala metoda Shore A s jednoduchou stupnicí tvrdosti 0-100, kde čidlo je ve tvaru komolého kužele. Přítlačná síla je vyvozována ocelovou pružinou, která se však považuje v měřící technice za nespolehlivý prvek. Při častém používání dochází také k obroušování hrany kužele a výměna nebo oprava je složitá. Proto je stále více používán kuličkový tvrdoměr. Jako čidla se dají požit ocelové kuličky přesného průměru určených pro ložiska, takže se dají snadno vyměnit a jsou trvalejší. Zatížení je vyvozováno závažím a celá konstrukce tvrdoměru je uzpůsobena tak, aby výsledky měření se co nejméně lišily od tvrdostní škály Shore A. Proměnná je hloubka vniku kuličky do zkoušeného materiálu měřená výškovým indikátorem.

U tvrdoměru IRHD se používá kulička o průměru 2,5 mm. Pro měření tvrdosti u výrobků, jejichž tloušťka je obvykle menší, se používá mikrotvrdoměr s průměrem kuličky 0,395 mm. [5]

Tato zkouška se dělí na standardní metody měření tvrdosti a měření zdánlivé tvrdosti.

Standardní metody měření tvrdosti

- Metoda N, také označována jako normální zkouška je vhodná pro pryže o tvrdosti v rozsahu 35 IRHD až 85 IRHD, ale připouští se použití v rozsahu tvrdosti 30 IRHD až 95 IRHD.
- Metoda H, zkouška pro vysoké tvrdosti je vhodná pro pryže o tvrdosti v rozsahu 85 IRHD až 100 IRHD.
- Metoda L, zkouška pro nízké tvrdosti je vhodná pro pryže o tvrdosti v rozsahu 10 IRHD až 35 IRHD.
- Metoda M, čili mikrometoda je v podstatě upravená verze normální zkušební metody N, umožňující zkoušení tenkých a malých zkušebních těles. Je zkušební metodou vhodnou pro pryže o tvrdosti v rozsahu 35 IRHD až 85 IRHD, ale je také používána pro tvrdosti v rozsahu 30 IRHD až 95 IRHD.

Metody CN, CH, CL a CM jsou zkoušky zdánlivé tvrdosti na zakřivených površích a jsou modifikacemi metod N, H, L a M. [11]

1.6.2 Zkušební zařízení

Rozměry a použité síly zkušebního zařízení pro základní metody jsou uvedeny v následující tabulce:

Zkouška	Rozměry mm	Síla působící na kuličku			Síla působící na patku N
		Kontaktní N	Vtlačovací N	Celková N	
Metoda N (normální zkouška)	Kulička $2,50 \pm 0,01$ Patka 20 ± 1 Otvor 6 ± 1	$0,30 \pm 0,02$	$5,40 \pm 0,01$	$5,70 \pm 0,03$	$8,3 \pm 1,5$
Metoda H (vysoká tvrdost)	Kulička $1,00 \pm 0,01$ Patka 20 ± 1 Otvor 6 ± 1	$0,30 \pm 0,02$	$5,40 \pm 0,01$	$5,70 \pm 0,03$	$8,3 \pm 1,5$
Metoda L (nízká tvrdost)	Kulička $5,00 \pm 0,01$ Patka 22 ± 1 Otvor 10 ± 1	$0,30 \pm 0,02$	$5,40 \pm 0,01$	$5,70 \pm 0,03$	$8,3 \pm 1,5$
Metoda M (mikrometoda)	Rozměry mm	Kontaktní mN	Vtlačovací mN	Celková mN	Síla působící na patku mN
	Kulička $0,395 \pm 0,005$ Patka $3,35 \pm 0,15$ Otvor $1,00 \pm 0,15$	$8,3 \pm 0,5$	$145 \pm 0,5$	$153,3 \pm 1,0$	235 ± 30

POZNÁMKA 1 U mikrometody, v případě používání přístrojů, u kterých je stolek pro zkušební těleso tlačem směrem vzhůru pružinou, tvoří celkovou sílu hodnota tlaku patky a síly působící na patku během doby působení celkové síly. Před působením vtlačovací síly 145 mN je síla na patku při tomto uspořádání větší a dosahuje hodnoty $380 \text{ mN} \pm 30 \text{ mN}$.

POZNÁMKA 2 Ne všechny kombinace rozměrů a sil z této tabulky mohou odpovídat tlakovým požadavkům 5.2.4.

Tab.3 Použité síly a rozměry zkušebního zařízení [11]

1.6.3 Provedení zkoušky

Před vlastním měřením se zkušební vzorky kondicionují při teplotě 23°C nebo 27°C nejméně 3 hodiny. Zkušební vzorky se přitlačnou patkou přitlačí k podložce přístroje, uvolní se výškový indikátor a po dobu 5-8 sec se nechá působit předtížení. Je-li indikátor se stupnicí přímo v jednotkách IRHD, pak musí být ručička po působení předtížení nastavena na hodnotu 100. Ihned se uvolní i základní zatížení a po 30 sec. se odečte příslušný údaj.

Je-li výškový indikátor se stupnicí v metrických jednotkách délky, pak se pro předtížení nastaví stupnice na 0 ještě před měřením. Měření se provede na třech různých místech zkušební tělesa. Tvrdost IRHD se odečte z převodních tabulek podle naměřené hloubky vtlačení v 0,01 mm.

Při použití mikrotvrdoměru se hloubka vtlačení násobí koeficientem 6 a získaná hodnota se převede na IRHD z převodní tabulky pro větší kuličku. Jedna IRHD jednotka tvrdosti odpovídá přibližně stejnému rozdílu v modulu pružnosti. U pryže s vysokou elasticitou odpovídají přibližně stupňům Shore A. [5]

1.6.4 Zkušební vzorek

Pro základní metody N, H, L a M

- Všeobecně u těchto metod platí, že horní a spodní povrch zkušebních vzorků musí být plochý, hladký a navzájem paralelní. Pro srovnání zkoušek musí být vyrobeny zkušební vzorky stejné tloušťky.

Metoda N a H

- Standardní zkušební vzorky musí mít tloušťku 8 mm až 10 mm a musí být tvořeny jednou nebo více vrstvami pryže, z nichž nejtencí nesmí mít tloušťku menší než 2 mm. Všechny povrchy musí být ploché a paralelní. Nestandardní zkušební vzorky mohou být tlustší nebo tenčí, jejich tloušťka nesmí však být menší než 4 mm.

Metoda L

- Standardní zkušební vzorky musí mít tloušťku 10 až 15 mm a musí být tvořena jednou nebo více vrstvami pryže, z nichž nejtencí nesmí mít tloušťku menší než 2 mm. Všechny povrchy musí být ploché a paralelní.

Nestandardní zkušební tělesa mohou být buď tlustší nebo tenčí, jejich tloušťka nesmí však být menší než 6 mm.

Metoda M

- Standardní zkušební vzorky musí mít tloušťku $2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Tlustší nebo tenčí zkušební tělesa se mohou použít, nesmí však mít tloušťku menší než 1 mm. Hodnoty stanovené na takových zkušebních vzorcích obecně nejsou srovnatelné s hodnotami stanovenými na standardních zkušebních vzorcích. [11]

1.7 Metody měření tvrdosti pro měkké polymery

1.7.1 Tvrdost podle DVM

Pro velmi měkké materiály, např. PVC plastigely nebo velmi měkkou pryž, se používá měření tvrdosti podle DVM. Vznikla úpravou Martensova kuličkového tvrdoměru, který se používal pro měření pryže konstantním zatížením 100 g na kuličku o průměru 5 mm. Dalším vývojem vznikl tvrdoměr s průměrem kuličky 100 mm a zatížením 1000 g. Číslo tvrdosti se odečítá přímo v setinách mm hloubky vtisku a ta se zjišťuje pomocí výškového indikátoru. Hloubka vtisku se odečítá po 10 vteřinách a čím je pryž měkkší, tím větší číslo dostaneme.

Hlavní součástí přístroje je citlivý výškový ukazatel se stupnicí dělenou 0-2 mm po 0,01 mm dílcích. Zkušební vzorky mají mít hladký povrch s minimální tloušťkou 6 mm a měření se provádí minimálně 10 mm od okrajů zkušebního vzorku. Postupuje se tak, že se přitlačí kulička na povrch tělesa, kde působí předtížení 50 g dané vahou tyčinky a kuličky. Ukazatel musí být na nule. Páčkou se vzorek plně zatíží a po 10 vteřinách se odečte hodnota tvrdosti. Přístroj je konstruován tak, že se na něm dá měřit tvrdost hotových výrobků např. hadic apod. [5]

1.7.2 Tvrdost podle Mohse

Tvrdost podle Mohse je tvrdost nerostu podle stupnice, v níž jsou jednotlivé nerosty seřazeny podle tvrdosti. Tvrdost se určí postupným rýpáním ostrou hranou nerostu a zkoušeného materiálu tak dlouho, až se materiál s použitým nerostem nedá rýpat. Což znamená, že obě hmoty jsou stejně tvrdé a zkoušený materiál má stejné číslo tvrdosti jako srovnávaný člen stupnice. Pokud zkoušený materiál rýpe určitý člen stupnice a nejbližší tvrdší člen ji také rýpe, pak leží tvrdost mezi oběma členy Mohsovy stupnice a udává se s číslem 0,5

vyšším, než je nižší člen. Tato metoda se pro polymery téměř nepoužívá. Jejím nedostatkem je, že se hodnoty nedostávají ve fyzikálních veličinách. [2]

Stupnice	Nerost	Stupnice	Nerost
1	Mastek	6	Živec
2	Sůl kamenná	7	Křemen
3	Vápenec	8	Topas
4	Kazivec	9	Korund
5	Apatit	10	diamant

Tab.4 Mohsova stupnice tvrdosti [2]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

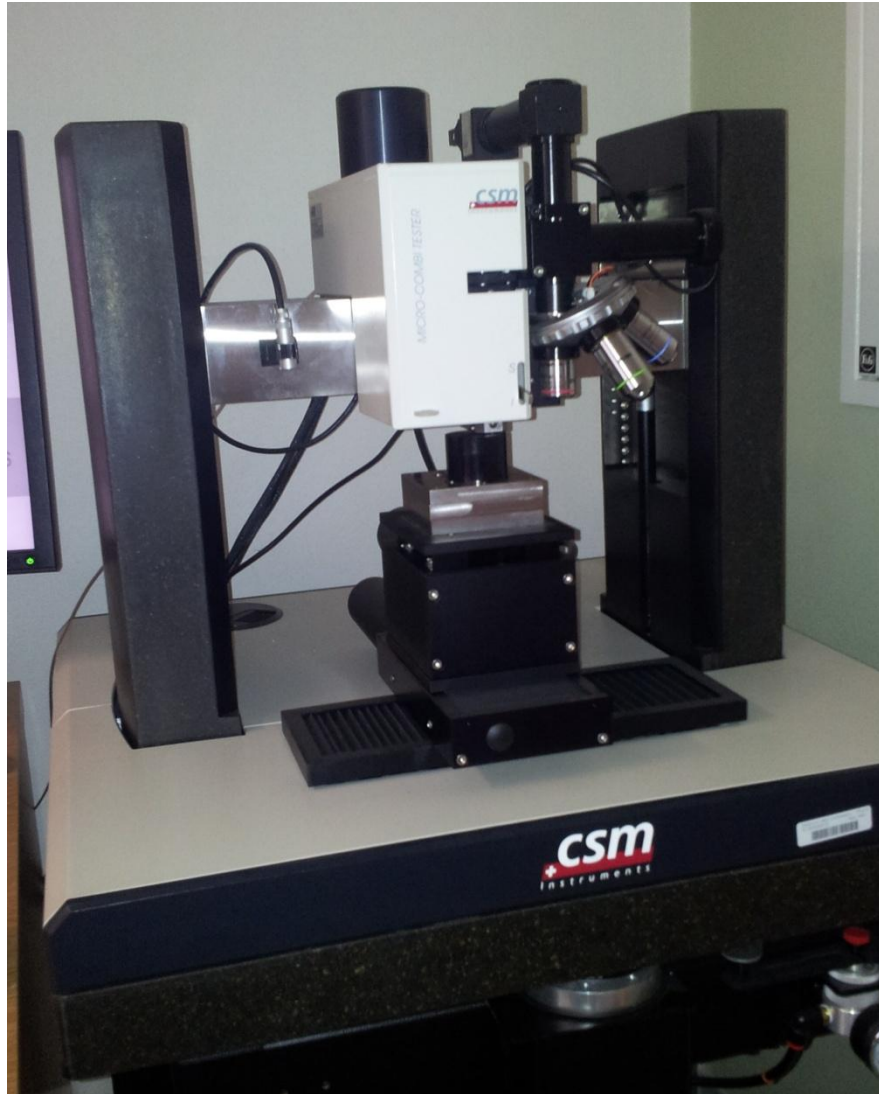
Bakalářská práce se zabývá měřením mikrotvrdomosti a makrotvrdomosti povrchové vrstvy polyamidu 6 a polyamidu 66 plněného 30% skelných vláken, modifikovaného beta zářením. Testovaná zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 470C. Zkušební tělesa byla následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, a 99 kGy. Měření mikrotvrdomosti proběhlo na mikrotvrdoměru Micro Combi testeru od firmy CSM Instruments, při zatížení 1N. Měření makrotvrdomosti bylo realizováno na tvrdoměru OMAG Affri ART 13 metodami Shore A a Shore D. Každý soubor měření obsahoval 10 kusů zkušebních těles. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

2.1 Určování tvrdosti

Zkoušky tvrdosti Shore A a Shore D byly prováděny na tvrdoměru OMAG Affri ART 13 s výměnnými sondami a mikrotvrdomost se měřila na CSM Micro Combi tester, které patří Ústavu výrobního inženýrství. Naměřené hodnoty byly matematicky a graficky zpracovány a vyhodnoceny.



Obr.7 OMAG Affri ART 13 s výměnnými sondami



Obr. 8 CSM Micro Combi tester

2.1.1 Vyhodnocení tvrdosti

Naměřené hodnoty byly zprůměrovány pomocí aritmetického průměru podle vzorce:

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

n- počet naměřených hodnot

x_i - naměřená hodnota

\bar{x} - aritmetický průměr

2.2 Měření tvrdosti

2.2.1 Měření tvrdosti u polyamidu 6

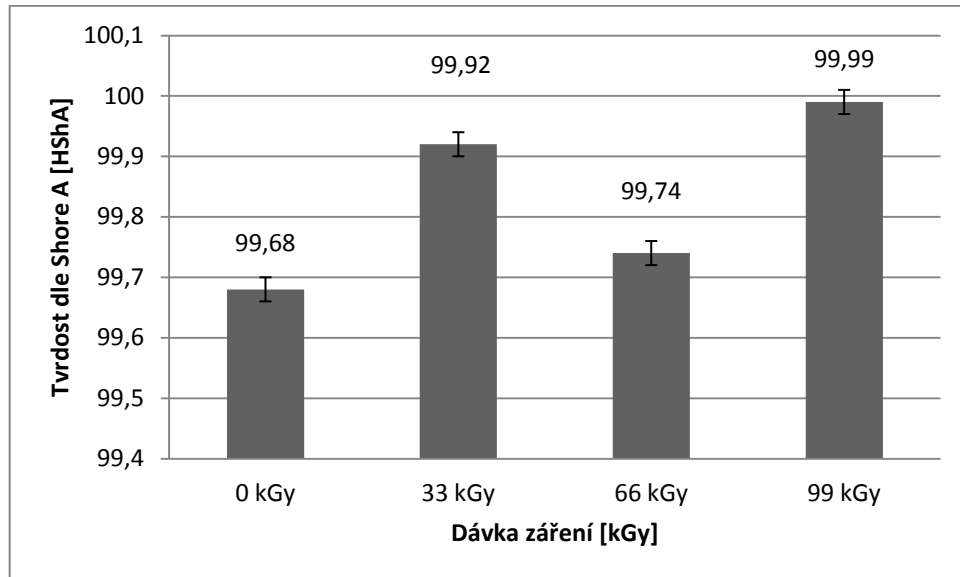
Polyamid 6 je tvrdá, světle žlutá hmota rohovitého vzhledu, která taje při 215 až 220°C na nízkoviskózní kapalinu. V běžných rozpouštědlech se nerozpouští, ale rozpouští se ve fenolech, kyselině mravenčí a bezvodé kyselině octové. Polykaprolaktam má dobré mechanické vlastnosti, nízký koeficient tření, mimořádnou odolnost proti otěru, dobrou rázovou houževnatost, dobré elektroizolační vlastnosti aj. Neodolává anorganickým kyselinám a oxidačním činidlům.

Používá se pro výrobu textilních vláken a důležité je jeho použití jako konstrukčního materiálu pro výrobu ložisek, ozubených kol, vaček, cívek, ovládacích elementů aj. Polyamid 6 se zvlákňuje protlačováním taveniny tryskami. Vytvořené vlákno se pak dluží a praním se zbavuje monomeru. Vyrábí se z něho hedvábná vlákna, stříž, kordy do pneumatik, kobercová vlákna, monofily na štětiny, žíně, vlasce aj. Vlákna mají značnou pevnost v tahu a výbornou odolnost proti otěru. [16]

2.2.1.1 Měření tvrdosti metodou Shore A polyamidu 6

Měření tvrdosti bylo realizováno metodou Shore A a probíhalo na měřicím přístroji OMAG Affri ART 13 s vyměnitelnou digitální sondou pro měření Shore A, kde je indentor s tupým hrotem o úhlu 35°. Měření na zkušebních tělesech bylo provedeno vždy 10krát a naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření metodou Shore A vyplynulo, že největší tvrdost 99,99 HShA jsme naměřili u zkušebního tělesa, které bylo ozářeno dávkou beta záření 99 kGy. Naopak nejmenší tvrdosti bylo dosaženo u neozářeného zkušebního tělesa (99,68 HShA), jak je patrné z obrázku 9.

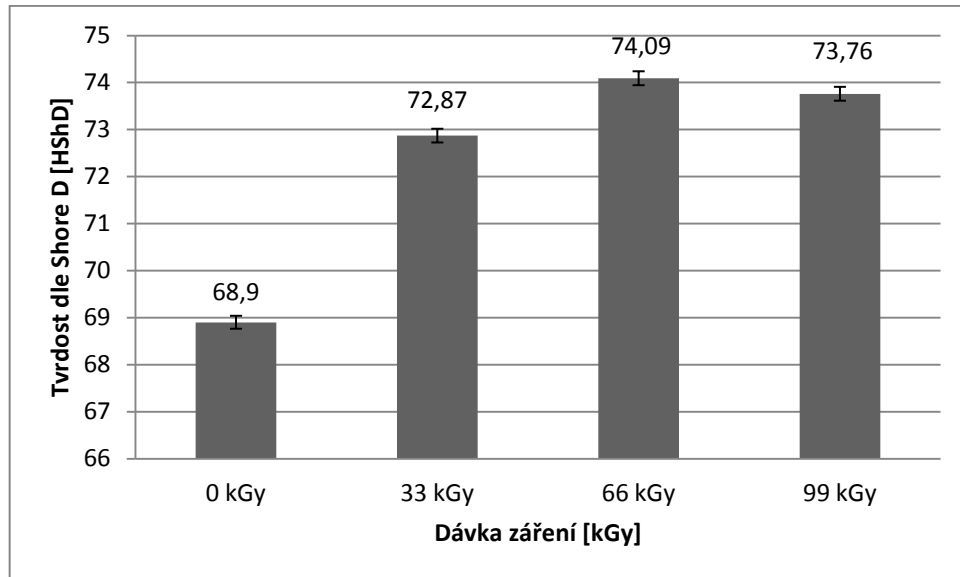


Obr.9 Porovnání výsledků naměřených hodnot Shore A pro PA6

2.2.1.2 Měření tvrdosti metodou Shore D polyamidu 6

Měření tvrdosti probíhalo metodou Shore D a probíhalo na měřicím přístroji OMAG Affri ART 13 s vyměnitelnou digitální sondou pro měření Shore D, kde je indentor s ostrým hrotem o úhlu 30°. Měření na zkušebních tělesech bylo provedeno vždy 10krát a naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření metodou Shore D vyplynulo, že největší tvrdost 74,09 HShD jsme naměřili u zkušebního tělesa, které bylo ozářeno dávkou beta záření 66 kGy. Naopak nejmenší tvrdosti bylo dosaženo u neozářeného zkušebního tělesa (68,9 HShD), jak je patrné z obrázku 10.

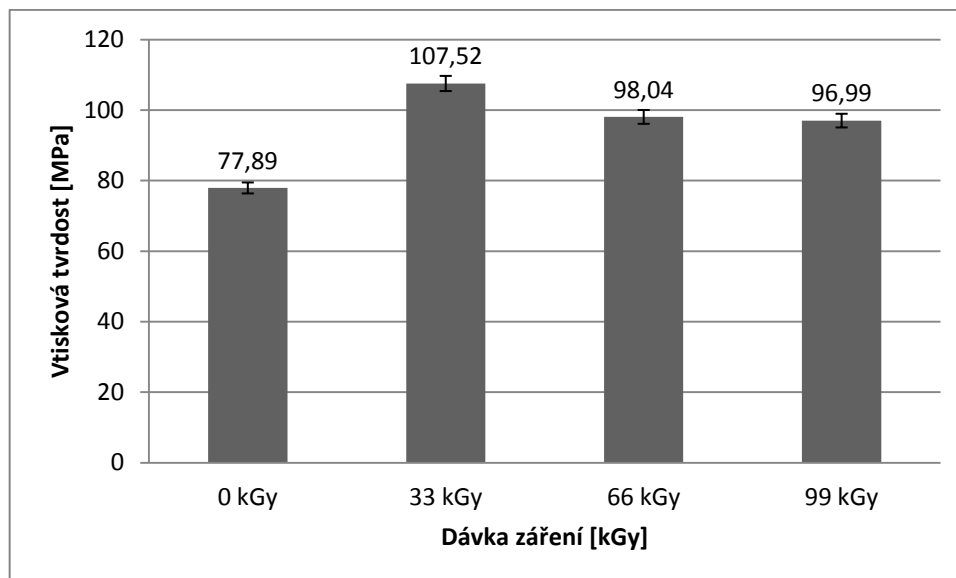


Obr.10 Porovnání výsledků naměřených hodnot Shore D pro PA6

2.2.1.3 Měření mikrotvrdości PA6

Měření mikrotvrdości probíhalo na mikrotvrdoměru Micro-Combi tester od firmy CSM Instruments. Při měření mikrotvrdości bylo použito zatížení 1N. Měření na zkušebních tělesech bylo provedeno vždy 10krát a naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření mikrotvrdości vyplynulo, že největší tvrdost 107,52 MPa jsme naměřili u zkušebního tělesa, které bylo ozářeno dávkou beta záření 33 kGy. Naopak nejmenší tvrdosti bylo dosaženo u neozářeného zkušebního tělesa (77,89 MPa), jak je patrné z obrázku 11.



Obr.11 Porovnání výsledků naměřených hodnot vtiskové tvrdosti pro PA6

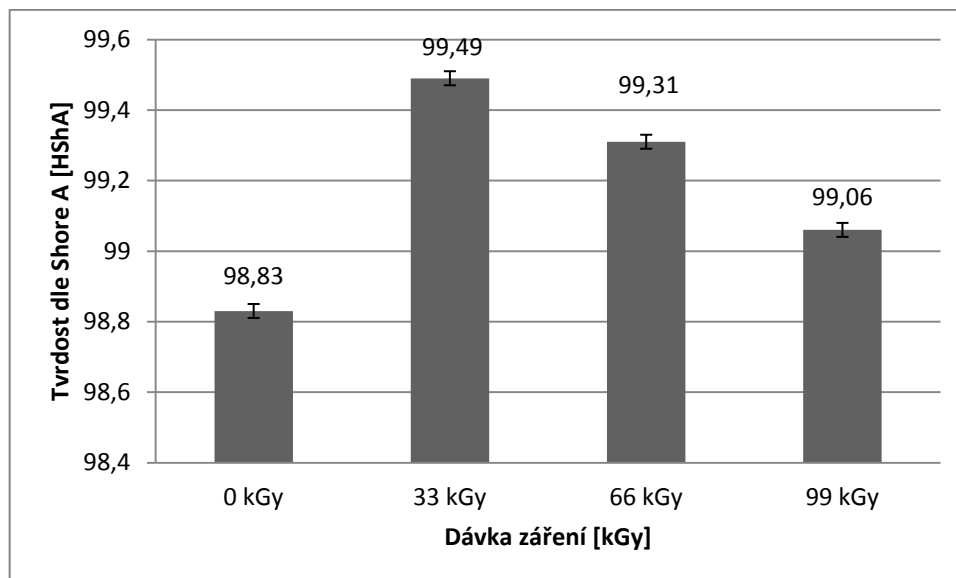
2.2.2 Měření tvrdosti u polyamidu 66 plněného 30% skelnými vlákny

Polyamid 66 má výhodu ve vysokém bodu tání a v poněkud vyšší pevnosti a o něco nižší navlhavosti než polyamidu 6. Další výhodou ve srovnání s polyamidem 6 je to, že neobsahuje volný polymer, takže odpadá jeho odstraňování. Polyamid 66 slouží v širokém měřítku jako plast i jako materiál pro výrobu vláken a fólií. [16]

2.2.2.1 Měření tvrdosti metodou Shore A polyamidu 66

Měření tvrdosti bylo realizováno metodou Shore A a probíhalo na měřicím přístroji OMAG Affri ART 13 s vyměnitelnou digitální sondou pro měření Shore A, kde je indentor s tupým hrotem o úhlu 35°. Měření na zkušebních tělesech bylo provedeno vždy 10krát a naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření metodou Shore A vyplynulo, že největší tvrdost 99,49 HShA jsme naměřili u zkušebního tělesa, které bylo ozářeno dávkou beta záření 33 kGy. Naopak nejmenší tvrdosti bylo dosaženo u neozářeného zkušebního tělesa (98,83 HShA), jak je patrné z obrázku 12.

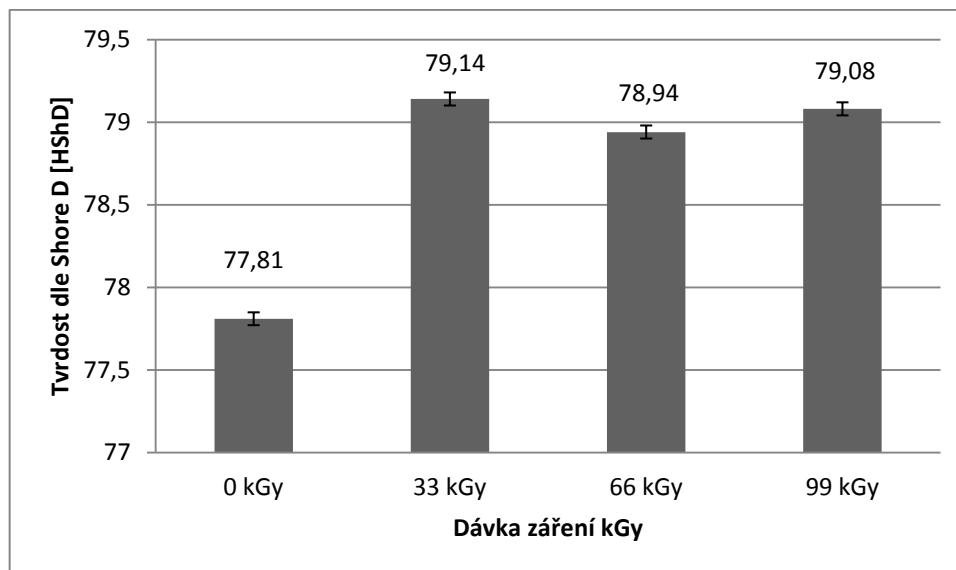


Obr.12 Porovnání výsledků naměřených hodnot Shore A pro PA66

2.2.2.2 Měření tvrdosti metodou Shore D polyamidu 66

Měření tvrdosti bylo realizováno metodou Shore D a probíhalo na měřícím přístroji OMAG Affri ART 13 s vyměnitelnou digitální sondou pro měření Shore A, kde je indenter s ostrým hrotem o úhlu 30°. Měření na zkušebních tělesech bylo provedeno vždy 10krát a naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření metodou Shore D vyplynulo, že největší tvrdost 79,14 HShD jsme naměřili u zkušebního tělesa, které bylo ozářeno dávkou beta záření 33 kGy. Naopak nejmenší tvrdosti bylo dosaženo u neozářeného zkušebního tělesa (77,81 HShD), jak je patrné z obrázku 13.

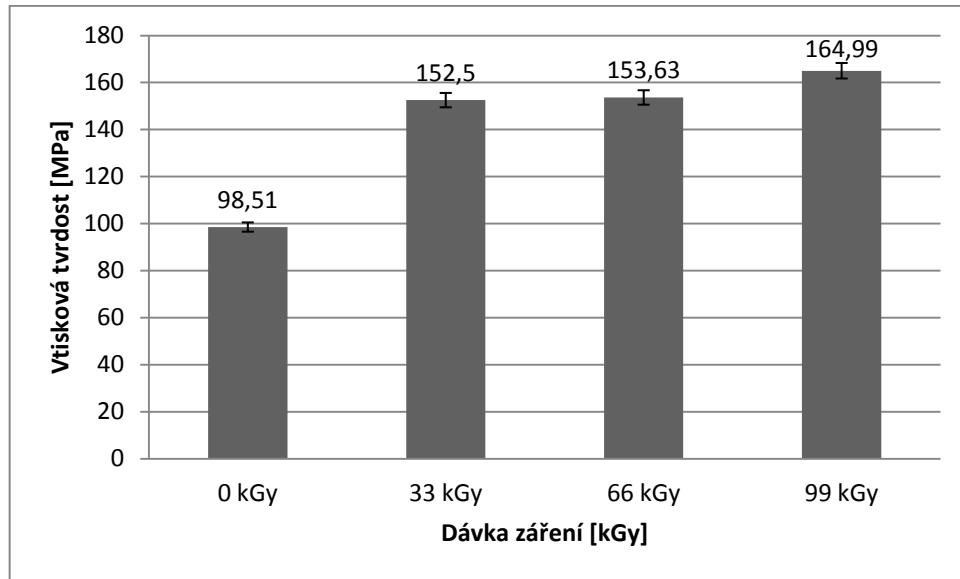


Obr.13 Porovnání výsledků naměřených hodnot Shore D pro PA66

2.2.2.3 Měření mikrotvrdości polyamidu 66

Měření mikrotvrdości probíhalo na mikrotvrdoměru Micro Combi testeru od firmy CSM Instruments Micro Combi tester. Při měření mikrotvrdości bylo použito zatížení 1N. Měření na zkušebních tělesech bylo provedeno vždy 10krát a naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření mikrotvrdości vyplynulo, že největší tvrdost 164,99 MPa jsme naměřili u zkušebního tělesa, které bylo ozářeno dávkou beta záření 99 kGy. Naopak nejmenší tvrdosti bylo dosaženo u neozářeného zkušebního tělesa (98,51 MPa), jak je patrné z obrázku 14.



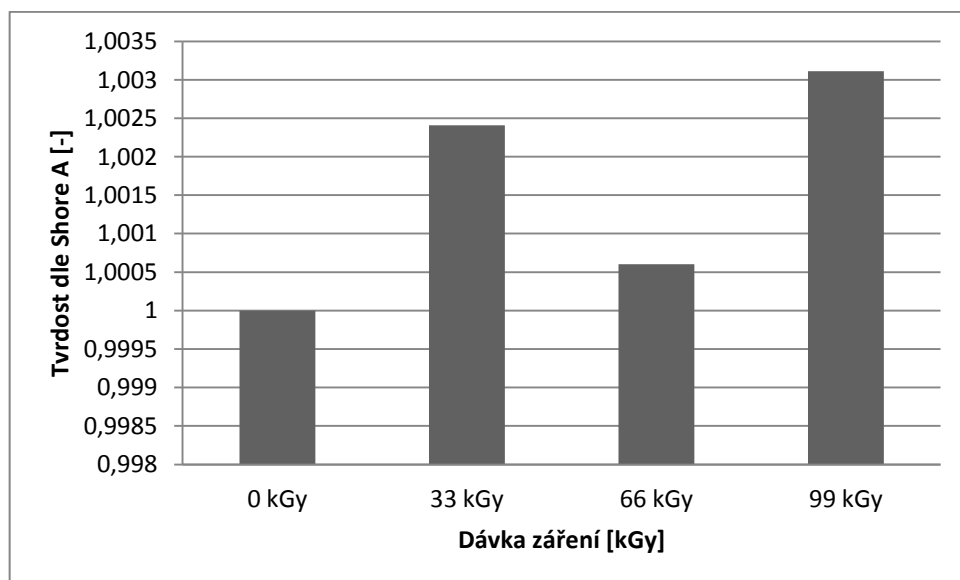
Obr. 14 Porovnání výsledků naměřených hodnot vtiskové tvrdosti pro PA66

3 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Bakalářská práce se zabývala měřením makrotvrdosti a mikrotvrdosti povrchové vrstvy polymidu 6 a polyamidu 66 plněného 30 % skelných vláken, modifikovaného beta zářením. Testovaná zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikováním na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 470C. Zkušební tělesa byla následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, a 99 kGy. Měření mikrotvrdosti proběhlo na mikrotvrdoměru MicroCombi testeru od firmy CSM Instruments, při zatížení 1N. Měření makrotvrdosti bylo realizováno na tvrdoměru OMAG Affri Art 13 metodami Shore A a Shore D. Každý soubor měření obsahoval 10 kusů zkušebních těles. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

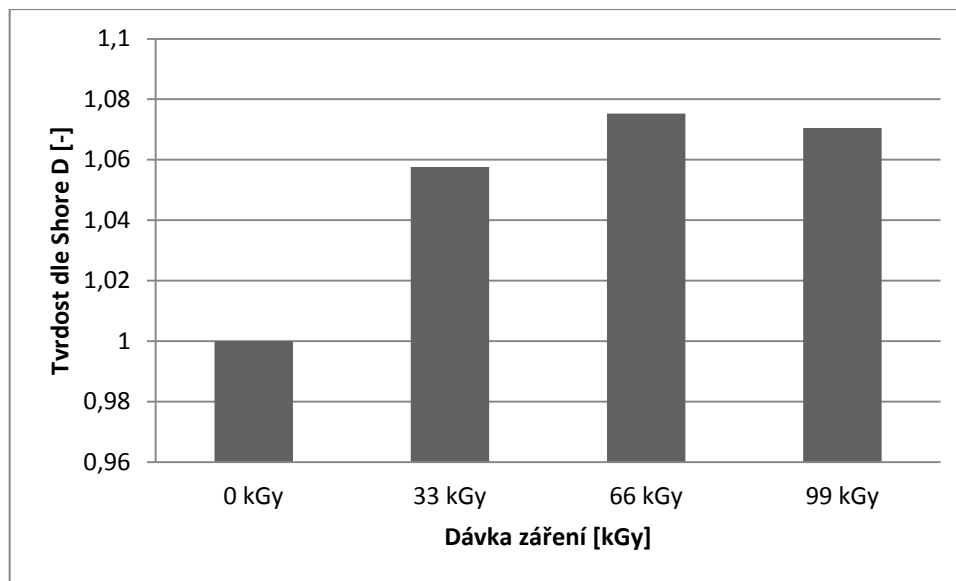
3.1 Měření tvrdosti u polyamidu 6

Výsledky měření tvrdosti metodou Shore A ukázaly, že nejnižší hodnota tvrdosti byla zjištěna u neozářeného zkušebního tělesa, naopak nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 99 kGy. Nárůst hodnot tvrdosti u ozářeného zkušebního tělesa byl srovnatelný s hodnotami tvrdosti neozářeného testovaného zkušebního tělesa, jak je patrné z obrázku 15.



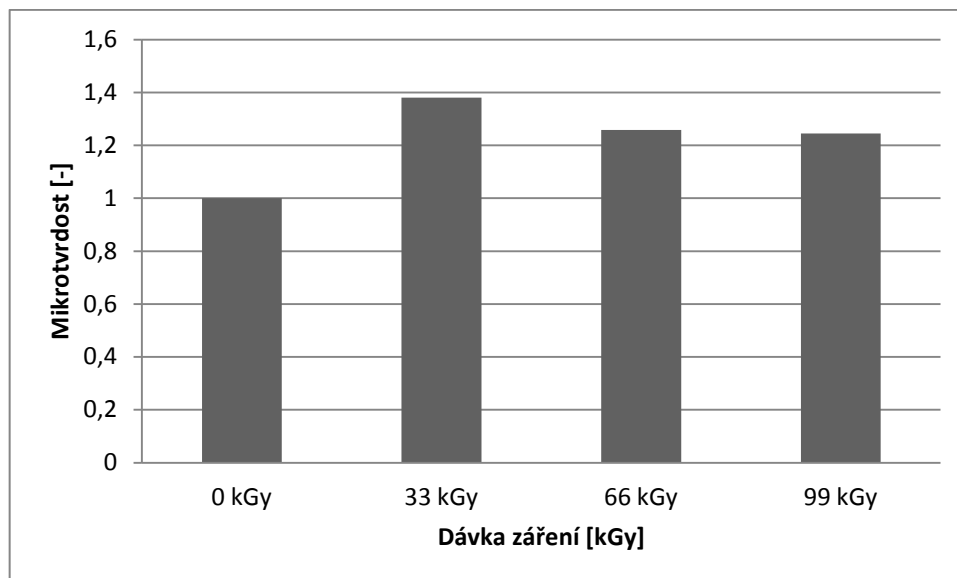
Obr. 15 Porovnání výsledků tvrdosti PA6 měřeného metodou Shore A

Výsledky měření tvrdosti metodou Shore D ukázaly, že nejnižší hodnota tvrdosti byla zjištěna u neozářeného zkušebního tělesa, naopak nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 66 kGy. Nárůst hodnot tvrdosti u ozářeného zkušebního tělesa byl srovnatelný s hodnotami tvrdosti neozářeného testovaného zkušebního tělesa, jak je patrné z obrázku 16.



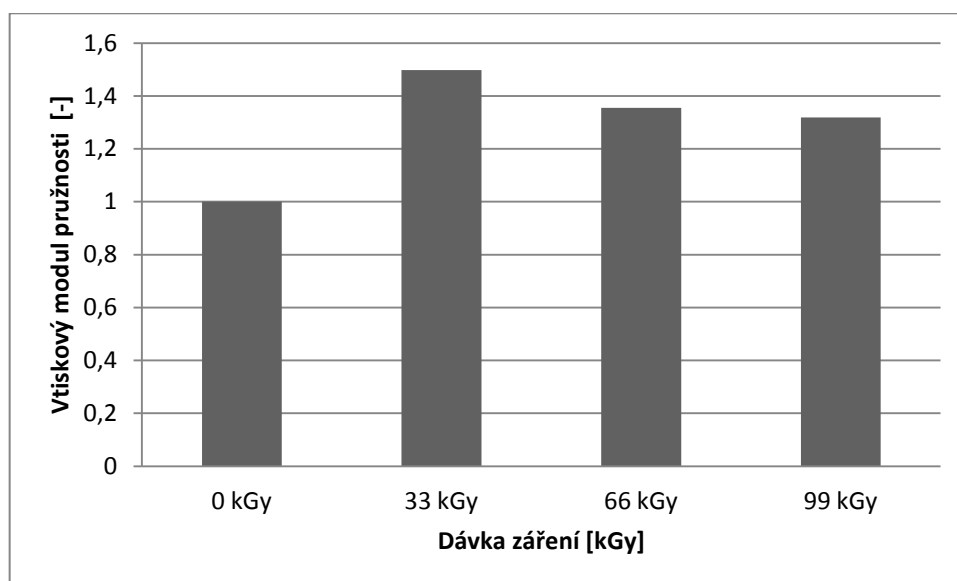
Obr. 16 Porovnání výsledků tvrdosti PA6 měřeného metodou Shore D

Výsledky měření mikrotvrdomosti ukázaly, že nejnižší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna u neozářeného zkušebního tělesa, naopak nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 33 kGy. Nárůst hodnot mikrotvrdomosti u ozářeného zkušebního tělesa, ozářeného dávkou beta záření byl v průměru 40 %, jak je patrné z obrázku 17.



Obr. 17 Porovnání výsledků mikrotvrdości PA6

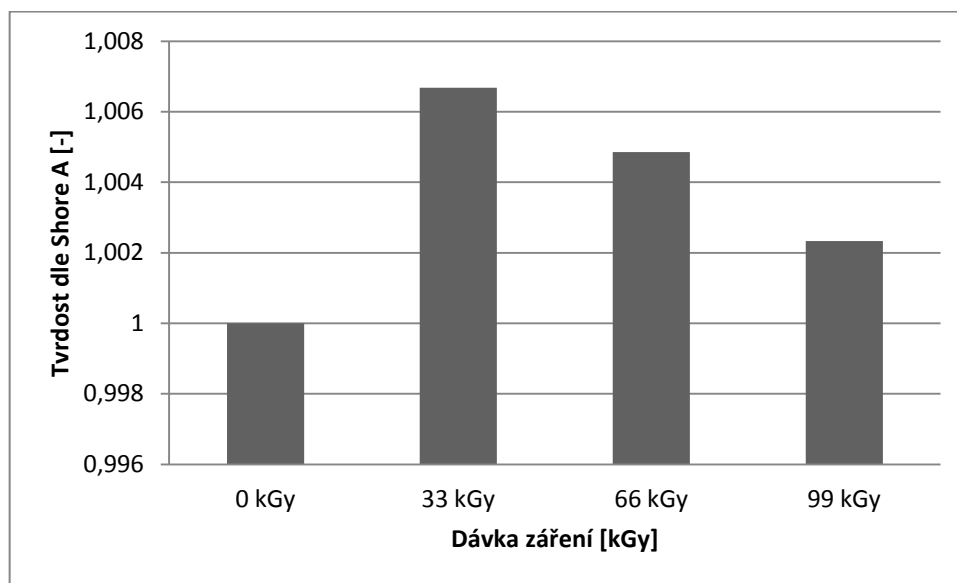
Výsledky měření vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované povrchové vrstvy ukázaly, že nejnižší hodnota mikrotuhosti byla zjištěna u neozářeného zkušebního tělesa, naopak nejvyšší hodnota mikrotuhosti byla naměřena u zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 33 kGy. Nárůst hodnot vtiskového modulu u ozářeného zkušebního tělesa vůči neozářenému zkušebnímu tělesu byl o skoro 50%, jak je patrné z obrázku 18.



Obr. 18 Porovnání výsledků vtiskového modulu PA6

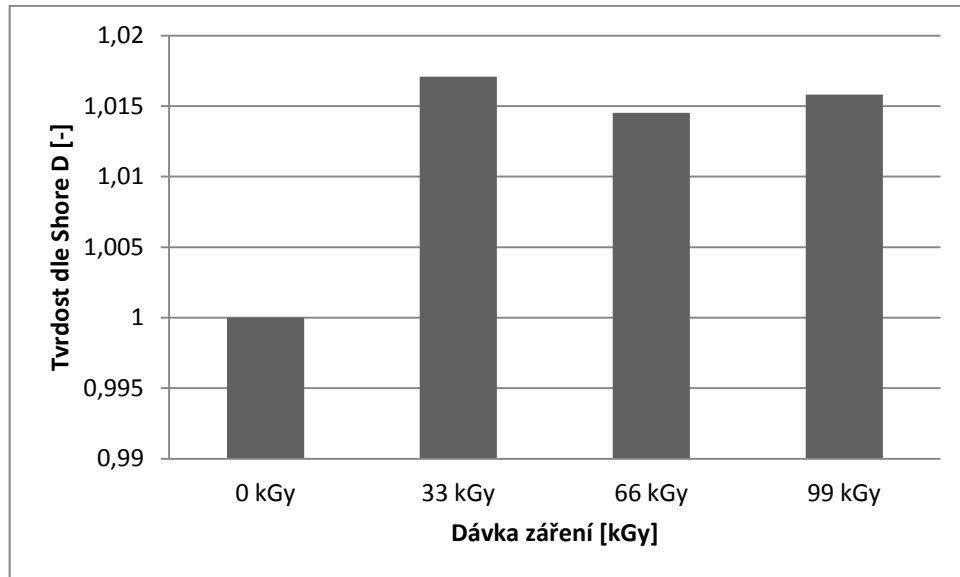
3.2 Měření tvrdosti u polyamidu 66 plněného ze 30% skelnými vlákny

Výsledky měření tvrdosti metodou Shore A ukázaly, že nejnižší hodnota tvrdosti byla zjištěna u neozářeného zkušební tělesa, naopak nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u zkušební tělesa ozářeného dávkou beta záření 33 kGy. Nárůst hodnot tvrdosti u ozářeného zkušební tělesa byl srovnatelný s hodnotami tvrdosti neozářeného testovaného zkušební tělesa, jak je patrné z obrázku 19.



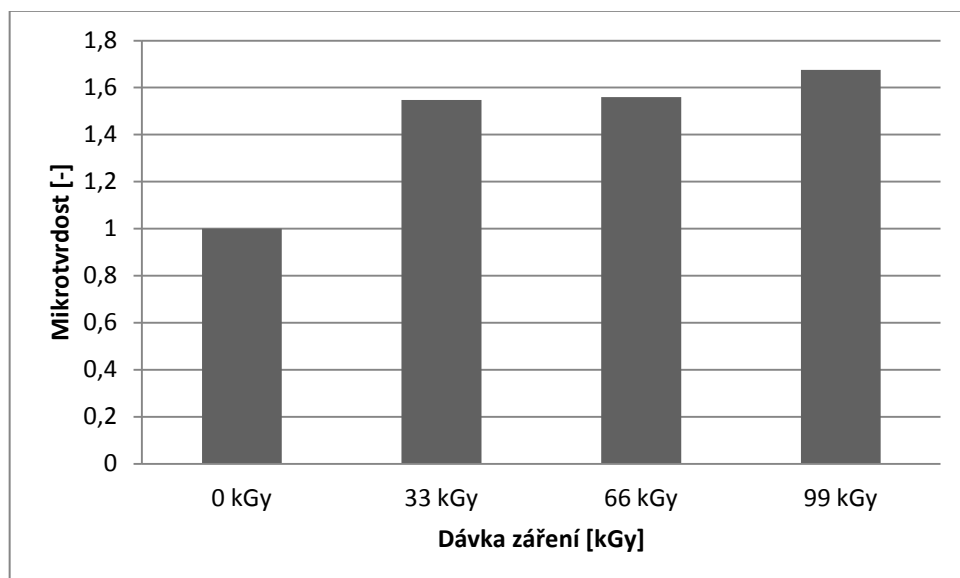
Obr. 19 Porovnání výsledků tvrdosti PA66 měřeného metodou Shore A

Výsledky měření tvrdosti metodou Shore D ukázaly, že nejnižší hodnota tvrdosti byla zjištěna u neozářeného zkušební tělesa, naopak nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u zkušební tělesa ozářeného dávkou beta záření 33 kGy. Nárůst hodnot tvrdosti u ozářeného zkušební tělesa byl srovnatelný s hodnotami tvrdosti neozářeného testovaného zkušební tělesa, jak je patrné z obrázku 20.



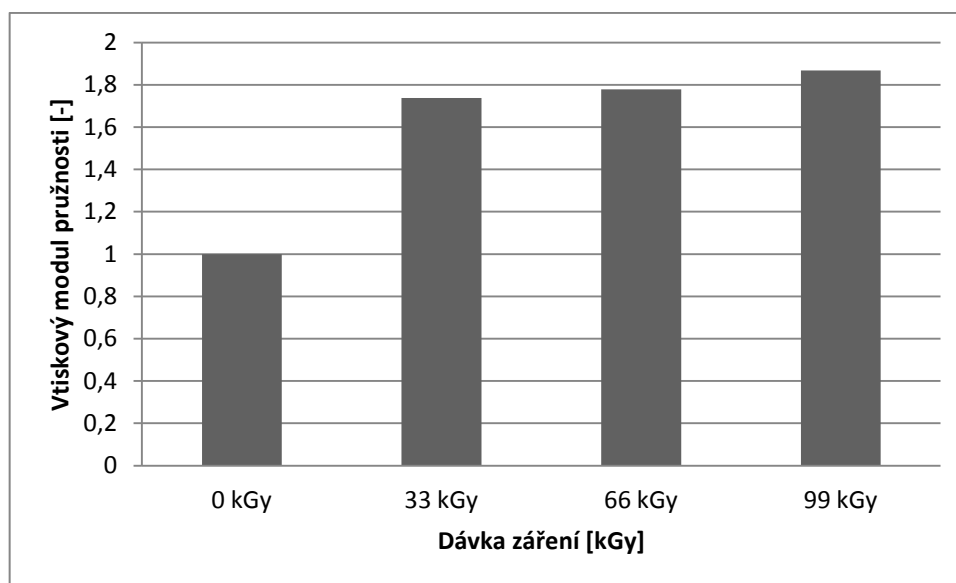
Obr. 20 Porovnání výsledků tvrdosti PA66 měřeného metodou Shore D

Výsledky měření mikrotvrdości ukázaly, že nejnižší hodnota tvrdosti byla zjištěna u neo-zářeného zkušebního tělesa, naopak nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 99 kGy. Nárůst hodnot tvrdosti u ozářeného zkušebního tělesa byl přes 60 %, jak je patrné z obrázku 21.



Obr. 21 Porovnání výsledků mikrotvrdości PA66

Výsledky měření vtiskového modulu ukázaly, že nejnižší hodnota vtiskového modulu byla zjištěna u neozářeného zkušební tělesa, naopak nejvyšší hodnota vtiskového modulu byla naměřena u zkušební tělesa ozářeného dávkou beta záření 99 kGy. Nárůst hodnot tvrdosti u ozářeného zkušební tělesa byl přes 80 %, jak je patrné z obrázku 22.



Obr. 22 Porovnání výsledků vtiskového modulu PA66

Výsledky měření ukázaly rozdíly v naměřených tvrdostech v makro a mikro měřítku. Modifikace polyamidu pomocí beta záření významně ovlivňuje makro a mikro mechanické vlastnosti. Ve struktuře vytváří 3D síť, která má vliv na výsledné chování testovaného zkušební tělesa. Makromechanické vlastnosti ovlivňuje nejen vytvořená 3D síť pomocí beta záření, ale i krystalické a amorfní oblasti. Povrchová vrstva testovaného zkušební tělesa, která je ve styku s dutinou formy chladne jinak, než střední část výrobku. V povrchové vrstvě je větší podíl amorfní části, která může hrát při zesítnění polyamidu zásadní roli. 3D síť se vytváří častěji v amorfní části, než-li v oblastech krystalických.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala měřením mikro a makrotvrdosti povrchové vrstvy polyamidu 6 a polyamidu 66 plněného 30% sklených vláken, modifikovaného beta zářením. Testovaná zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 470C. Zkušební tělesa byla následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, a 99 kGy. Měření mikrotvrdosti proběhlo na mikrotvrdoměru Micro-Combi testeru od firmy CSM Instruments, při zatížení 1N. Měření makrotvrdosti bylo realizováno na tvrdoměru OMAG metodami Shore A a Shore D. Každý soubor měření obsahoval 10 kusů zkušebních těles. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření vyplynulo, že nejvyšší hodnoty tvrdosti měřené metodami Shore A a Shore D byly zjištěny u testovaného zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 33 kGy. Nárůst hodnot tvrdosti vůči neozářenému testovanému zkušebnímu tělesu nebyl výrazný a byl zanedbatelný.

Při měření mikromechanických vlastností zkouškou mikrotvrdosti vyšlo najevo, že zlepšení mikromechanických vlastností je velmi výrazné. Při pohledu na výsledky vtiskové tvrdosti bylo zjištěno, že zlepšení hodnot vtiskové tvrdosti polyamidu neozářeného vůči ozářenému dosáhlo 40% u neplněného polyamidu 6 a přes 60% u plněného polyamidu 66 30 % skelných vláken.

Výsledky měření mikrotuhosti ukázaly, že u ozářených testovaných zkušebních těles došlo ke zvýšení mikrotuhosti o 50% u neplněného polyamidu 6 a 80% u plněného polyamidu 66 30% skelných vláken.

Tyto výsledky posunují testované materiály k výrobkům určeným pro náročnější aplikace, zejména odolnost povrchové vrstvy vůči opotřebení je zásadní u některých typů výrobků, zejména v automobilovém průmyslu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RYBNIKÁŘ, František a kolektiv. Analýza a zkoušení plastických hmot. 1.vydání Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965
- [2] JARUŠEK, Jaroslav. Metody zkoumání polymerů. 2 vydání Pardubice: Vysoká škola chemicko-technologická v Pardubicích, 1984
- [3] Zkoušky tvrdosti [online] http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [4] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. Strojírenská technologie 1 – 1.díl : Nauka o materialu. 3. vydání Praha : Scientia, 2002
- [5] SHÄTZ, Miroslav, Vondráček, Petr. Zkoušení polymeru. 1 vydání Praha: Sntl-nakladatelství technické literatury, 1979.
- [6] Zkoušky tvrdosti [online] http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf
- [7] ČSN EN ISO 291 – standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [8] ČSN EN ISO 868 Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtláčováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore) Praha: Český normalizační institut, 2003
- [9] ČSN EN ISO 2039-1. Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1 : Metoda vtláčením kuličky. Praha : Český normalizační institut, 2003.
- [10] ČSN EN ISO 2039-2. Plasty- Stanovení tvrdosti- Část 2 : Tvrdost podle Rockwella. Praha : Český normalizační institut, 2000.
- [11] ČSN ISO 48. Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tvrdosti (tvrdost mezi 10 IRHD a 100IRHD). Praha : Český normalizační institut, 2008.
- [12] ČSN EN ISO 6507-1. Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1 : Zkušební metoda. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [13] Hardness tests of ceramics [online]
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=hardness_tests_of_ceramics
- [14] The Brinell Hardness Test [online]
<http://www.gordonengland.co.uk/hardness/brinell.htm>
- [15] Skúšky tvrdosti [online] <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>
- [16] MLEZIVA, Josef. Polymery- výroba, struktura, vlastnosti a použití. 1.vyd. Praha: Sobotáles, 1993.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

d	Průměr vtisku
D	Průměr kuličky
e	Hloubka vtažení po odstranění přídavného zatížení
F	Zkušební síla
F _m	Zkušební zatížení
h	Hloubka vtisku
H	Označení tvrdosti
HB	Tvrdost podle Brinella
HShA	Tvrdost podle Shore A
HShD	Tvrdost podle Shore D
HR	Tvrdost podle Rockwella
HV	Tvrdost podle Vickerse
n	Počet naměřených hodnot
P	Zatěžovací síla jehlanu
PA6	Polyamid 6
PA66	Polyamid 66
u	Úhlopříčka vtisku
\bar{x}	Aritmetický průměr
x _i	Naměřená hodnota

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr.1 Ideální průběh vtisku</i>	16
<i>Obr.2 Skutečný průběh vtisku</i>	16
<i>Obr.3 Průběh zkušebního zatížení</i>	18
<i>Obr.4 Vnikací těleso</i>	19
<i>Obr.5 Zkušební hrot tvrdoměru typu A</i>	25
<i>Obr.6 Zkušební hrot tvrdoměru typu D</i>	26
<i>Obr.7 OMAG Affri ART 13 s výměnnými sondami</i>	33
<i>Obr.8 CSM Micro-combi tester</i>	34
<i>Obr.9 Porovnání výsledků naměřených hodnot Shore A pro PA6</i>	36
<i>Obr.10 Porovnání výsledků naměřených hodnot Shore D pro PA6</i>	37
<i>Obr.11 Porovnání výsledků naměřených hodnot vtiskové tvrdosti pro PA6</i>	38
<i>Obr.12 Porovnání výsledků naměřených hodnot Shore D pro PA66</i>	39
<i>Obr.13 Porovnání výsledků naměřených hodnot Shore D pro PA66</i>	40
<i>Obr.14 Porovnání výsledků naměřených hodnot vtiskové tvrdosti pro PA66</i>	41
<i>Obr.15 Porovnání výsledků tvrdosti PA6 měřeného metodou Shore A</i>	42
<i>Obr.16 Porovnání výsledků tvrdosti PA6 měřeného metodou Shore D</i>	43
<i>Obr.17 Porovnání výsledků mikrotvrdosti PA6</i>	44
<i>Obr.18 Porovnání výsledků vtiskového modulu PA6</i>	44
<i>Obr.19 Porovnání výsledků tvrdosti PA66 měřeného metodou Shore A</i>	45
<i>Obr.20 Porovnání výsledků tvrdosti PA66 měřeného metodou Shore D</i>	46
<i>Obr.21 Porovnání výsledků mikrotvrdosti PA66</i>	46
<i>Obr.22 Porovnání výsledků vtiskového modulu PA66</i>	47

SEZNAM TABULEK

<i>Tab.1 Doporučená zkušební zatížení</i>	20
<i>Tab.2 Hodnoty přídatných zatížení, předběžného zatížení a průměrů kuličky</i>	23
<i>Tab.3 Použité síly a rozměry zkušebního zatížení</i>	28
<i>Tab.4 Mohsova stupnice tvrdosti</i>	31