

Měření tvrdosti polymerů

Michal Martinek

Bakalářská práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal MARTINEK**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Měření tvrdosti polymerů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Provedte přípravu vzorků pro zkoušení tvrdosti
3. Provedte zkoušku tvrdosti
4. Vyhodnoťte naměřené výsledky



Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

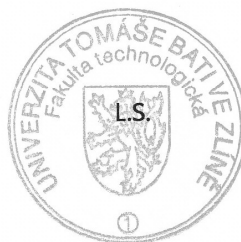
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Mañas, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2010**

Ve Zlíně dne 18. ledna 2010


doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.
vedoucí katedry

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 Zlíně14.5.2010

.....
Michal Martinek

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 nevydávalečně 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 náhrady chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výtěžku 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 výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je nejprve vymežit teoretickou koncepci měření tvrdosti polymeru se zaměřením na vnikací metody a následně prakticky aplikovat tyto metody na vybrané zkušební vzorky. Teoretická část je zaměřena na metody podle Brinella, Vickerse, Rockwella, Shoreho, IRHD a některé další metody, které se osvědčily v praxi. Praktická část je zaměřena na aplikaci vybraných metod na různé druhy polymeru.

Klíčová slova: tvrdost polymeru, tvrdost plastu, Brinell, Rockwell, Vickers, Shore, IRHD

ABSTRACT

The objective of this bachelor dissertation is first to define the theoretical concept of measuring the hardness of polymers with a focus on methods of penetrating and then practically apply these methods to the selected test samples. The theoretical part focuses on methods for Brinell, Vickers, Rockwell, Shore, IRHD and some other methods that have proven successful in practice. The practical part focuses on the application of selected methods for different types of polymer.

Keywords: hardness of polymer, hardness of plastic, Brinell, Rockwell, Vickers, Shore, IRHD

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Maňasovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a soustavnou pozornost, kterou mi při vypracování bakalářské práce věnoval.

Motto

„Učit se je jako veslovat proti proudu, jakmile ustaneš, žene tě to nazpátek“

Benjamin Britten (* 1913 – † 1976)

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

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ZKOUŠKY TVRDOSTI POLYMERŮ	12
1.1 ZÁKLADNÍ TERMINOLOGIE	12
1.1.1 Tvrdost	12
1.1.2 Zkoušky tvrdosti	12
1.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES A KONDICIOVÁNÍ	13
1.2.1 Příprava zkušebních těles	13
1.2.2 Kondicionování	14
1.3 METODA BRINELL	15
1.3.1 Princip zkoušky	15
1.3.2 Vnikající tělesa a zkušební zatížení	17
1.3.3 Zkušební tělesa (vzorky)	18
1.3.4 Provedení zkoušky	18
1.3.5 Zápis hodnoty tvrdosti	19
1.3.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Brinell	19
1.3.7 Související normy	20
1.4 METODA VICKERS	21
1.4.1 Princip metody	21
1.4.2 Vnikací tělesa a zkušební síly	22
1.4.3 Zkušební tělesa (vzorky)	22
1.4.4 Provedení zkoušky	23
1.4.5 Zápis hodnoty tvrdosti	23
1.4.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Vickers	24
1.4.7 Související normy	24
1.5 METODA ROCKWELL	25
1.5.1 Princip metody	25
1.5.2 Vnikající tělesa a zkušební zatížení	26
1.5.3 Zkušební tělesa (vzorky)	26
1.5.4 Provedení zkoušky	27
1.5.5 Zápis hodnoty tvrdosti	27
1.5.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Rockwella	28
1.5.7 Související normy	28
1.6 METODA SHORE	29
1.6.1 Princip zkoušky	29
1.6.2 Zkušební zařízení	29
1.6.3 Zkušební tělesa (vzorky)	30
1.6.4 Provedení zkoušky	30
1.6.5 Zápis hodnoty tvrdosti	31
1.6.6 Související normy	31
1.7 METODA IRHD	32
1.7.1 Princip zkoušky	32

1.7.2	Vnikací tělesa a zkušební síly.....	33
1.7.3	Zkušební tělesa (vzorky)	33
1.7.4	Provedení zkoušky.....	34
1.7.5	Zápis hodnoty tvrdosti	35
1.7.6	Související normy.....	35
1.8	NĚKTERÉ DALŠÍ METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	36
1.8.1	Tvrdost podle Mohse	36
1.8.2	Tvrdost lehčených polymerů.....	36
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	37
2	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	38
2.1	URČOVÁNÍ TVRDOSTI	38
2.1.1	Měřicí zařízení	38
2.1.2	Vyhodnocení tvrdosti.....	39
2.2	POLYAMIDY	40
2.2.1	Polyamid 6 (PA 6)	40
2.2.2	Polyamid 6.6 (PA 6.6).....	44
2.2.3	Polyamid 11 (PA 11).....	49
2.2.4	Polyamid 12 (PA 12).....	53
2.2.5	Polyamid 66 (PA 66).....	58
2.3	POLYESTERY	63
2.3.1	Polybutyltereftalát (PBT).....	63
2.3.2	Polykarbonát (PC)	67
2.3.3	Polykarbonát s 20% skelných vláken (PC GF20)	72
2.3.4	Polykarbonát s 30% skelných vláken (PC GF30).....	76
2.3.5	Polykarbonát regranulát (PC regranulát)	81
3	DISKUZE VÝSLEDKŮ	86
	ZÁVĚR	90
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	91
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	92
	SEZNAM OBRÁZKŮ	94
	SEZNAM TABULEK	97

ÚVOD

Tvrдость patří mezi mechanické vlastnosti materiálů a je často využívána v praxi. Například český výrobce polymeru Unipetrol a.s. sídlící v Praze uvádí ve svých informačních listech pro polyetylény metodu tvrdosti Shore D. Slovenský výrobce polymeru Slovnaft a.s. ve svých informačních listech také uvádí pro polyetylény zkoušku tvrdosti Shore D a pro polypropyleny Rockwellovu tvrdost v R škále. Německý výrobce Bayer uvádí ve své dokumentaci o polykarbonátech metodu tvrdosti podle Brinella.

Hlavní předností zkoušek tvrdosti je jejich relativní jednoduchost, opakovatelnost a dále také skutečnost, že v mnoha případech lze měření provádět buď přímo na výrobku a jeho polotovarech, nebo na zkušebních tělesech vyrobených a určených pro jiné druhy mechanických zkoušek, jako je například tahová zkouška.

Podle hodnoty tvrdosti lze také pomocí empirických vzorců vypočítat další vlastnosti materiálu. Existují převodové tabulky, díky nimž lze z hodnot tvrdosti zjistit jiné vlastnosti, jako například pevnost v tahu.

Tvrдость lze definovat jako odolnost materiálu proti místní deformaci vyvozené konkrétním zatěžovacím tělesem, neboli vnikajícím tělesem - indentorem přesného geometrického tvaru působením přesně definovaného zatížení. Mírou tvrdosti je konkrétní velikost trvalé plastické deformace. Této obecné definici o zkoušení tvrdosti materiálu vyhovuje přes 100 zkušebních metod, které se vyvíjely přes 200 let, ale hlavním cílem je vyvinout jednotnou koncepci, ke které se doposud nepodařilo dojít.

Cílem bakalářské práce je nejprve vymezit teoretickou koncepci měření tvrdosti polymeru se zaměřením na vnikací metody a následně prakticky aplikovat tyto metody na vybrané zkušební vzorky z polymeru. Teoretická část je zaměřena na vybrané metody měření tvrdosti se zaměřením na polymery, jejich rozdělení a využití. Seznámení s geometrií zkušebních tělísek a jejich následných otisků, ze kterých se určí výsledná hodnota tvrdosti. Praktická část je zaměřena na aplikaci vybraných metod na různé druhy polymeru. Bylo vybráno celkem deset různých druhů plastů z polyamidové a polyesterové skupiny, na kterých bylo realizováno měření tvrdosti metodou Shore se sondou D a metoda vtlačení kuličky o třech různých celkových zatíženích. Získané hodnoty byly vyhodnoceny, graficky zpracovány a porovnány.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZKOUŠKY TVRDOSTI POLYMERŮ

Tvrdot polymerů, jako jedna z mechanických vlastností, se v praxi běžně neuvádí, ale někteří výrobci polymeru ve svých informačních listech uvádějí hodnoty tvrdosti. Pro měkké plasty a kaučuky se tvrdost uvádí metodou podle Shoreho. Někdy se u tvrdých plastů uvádí hodnota tvrdosti podle Brinella nebo podle Rockwella.

1.1 Základní terminologie

Úvodem je důležité si vymezit základní pojmy jako např. tvrdost, zkoušky tvrdosti, rozdělení této zkoušky apod.

1.1.1 Tvrdot

Pojem tvrdost můžeme definovat různými způsoby. V odborné literatuře bývá nejčastěji definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Většina přístrojů, které se používají k měření tvrdosti, je založena právě na této definici. Hodnoty tvrdosti se uvádějí buď bez jednotek, nebo jim přisuzujeme jednotku MPa, jsou-li odvozeny ze vztahu mezi tlakovou silou a plochou vtisku. V praxi je lepší uvádět tvrdost jako číslo nepojmenované, pouze s udáním způsobu měření nebo stupnice, neboť často dochází k záměně za pevnost. Pro tvrdost používáme značku H. [6]

1.1.2 Zkoušky tvrdosti

Zkoušky tvrdosti patří mezi nejstarší a nerozšířenější zkoušky technických materiálů. Prakticky se jedná o zkoušky nedestruktivní, to znamená že funkční a vzhledové porušení materiálu je bezvýznamné. Zkoušky tvrdosti můžeme obecně rozdělit do tří skupin:

- zkoušky vrypové,
- zkoušky vnikací,
- zkoušky odrazové.

Vrypové zkoušky

V současnosti se používají jen pro tvrdé a křehké materiály (sklo, porcelán, aj.). Pro zkoumání tvrdosti polymerů nebo měkkých materiálů nejsou vhodné. V technické praxi se používá zkouška podle Martense (Ma). [6]

Vrypovou tvrdost podle Martense HMa zjišťujeme přitlačováním kuželového diamantového hrotu měnitelným tlakem na leštěný povrch zkušebního předmětu, kterým pohybujeme určitou rychlostí. Mírou tvrdosti je pak síla F , potřebná ke vzniku vrypu širokého 0,01 mm.

Vnikací zkoušky

Tento typ zkoušek je jeden z nejpoužívanějších pro zjišťování tvrdosti materiálů. Tato zkouška je charakteristická tím, že do zkoušeného vzorku vtlačujeme velmi tvrdé těleso (kulička, kužel, jehlan) a měřítkem tvrdosti je velikost vzniklého vtisku (jeho průměr, hloubka, úhlopříčka). Mezi nejznámější zkoušky tvrdosti patří zkoušky podle Brinella, Vickerse, Rockwella a Shore.

Zkoušky odrazové

Princip této metody spočívá v pružném odrazu závaží, spuštěného z určité výšky od zkoušeného materiálu. Hodnotou tvrdosti HSh (tvrdost podle Shoreho) je výška odskoku. Zařízení se nazývá Shoreův skleroskop. [6]

1.2 Příprava zkušebních těles a kondicionání

Celkové výsledky tvrdostních zkoušek jsou nejen závislé na vlastnostech polymeru, tj. chemickém složení, molekulové hmotnosti a její distribuci, krystalinitě, obsahu nečistot apod., ale ve značné míře jsou závislé na způsobu přípravy zkušebních tělísek a na režimu zpracování. Pro všechny polymeru neexistuje jednotný předpis pro přípravu zkušebních tělísek. [7]

1.2.1 Příprava zkušebních těles

Zkouška tvrdosti nevyžaduje zvláštní přípravu zkušebních těles. Zpravidla se používá rozšířené části zkušebního tělesa pro zkoušku tahem. Také je možné použít jiná zkušební tělesa, která jsou předepsána v materiálových nebo zkušebních normách. Vzorek musí být bez okrajových přetoků a musí mít rovnoběžné dvě plochy. Jakoukoliv nerovnost je potřeba vhodným způsobem obrousit. [8]

1.2.2 Kondicionování

Vlastnosti plastických hmot jsou ve značné míře ovlivňovány vlhkostí a teplotou. Proto se musí zkušební tělesa upravovat na vlhkost nejčastěji se vyskytující ve zkoušené plastické hmotě. Kondicionuje se uložením zkušebních těles v prostředí určité relativní vlhkosti při určité teplotě a po určitou dobu. Ze znalosti průběhu sorpce vody nebo vodní páry zkoušenou plastickou hmotou se určí podmínky kondicionování. U plastických hmot je rychlost sorpce vodní páry poměrně malá a dosažení rovnováhy je možné jen za dlouhou dobu. Aby se úprava zkrátila, doporučuje se zkušební těleso máčet v roztocích soli nebo ve vodě a dodatečně upravovat. Máčením se zvýší obsah vody v okrajových vrstvách, dodatečnou úpravou se má dosáhnout vyrovnání vlhkosti v celém průřezu zkoušeného tělesa. Pokud má plastická hmota nepatrnou nasákavost, upravují se zkušební tělíska po vyrobení uložením po určitou dobu v laboratorních podmínkách. Během této doby se částečně odstraní vnitřní pnutí, proběhne smrštění atd.

Zkušební tělesa se upravují ve skříní s regulovanou teplotou, cirkulací vzduchu a relativní vlhkostí. Vlhkost se kontroluje vlasovým vlhkoměrem, který se musí po určitých časových intervalech překontrolovat psychrometrem. Pokud jsme schopni dodržet potřebnou teplotu místnosti, můžeme zkušební tělesa upravovat v exsikátoru¹. K dosažení určité relativní vlhkosti v uzavřeném prostoru se běžně používá nasycených roztoků solí. Volbou vhodného roztoku a teploty se může měnit relativní vlhkost v širokém rozmezí. [8]

V normě ČSN EN ISO 291 (64 0204) Plasty – Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení jsou předepsány podmínky, které jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1. *Typy standardního prostředí* [2]

Symbol standardního prostředí	Teplota vzduchu [°C]	Relativní vlhkost [%]	Poznámka
23/50	23	50	Použije se mimo tropické země
27/65	27	65	Použije se v tropických zemí

¹ Exsikátor je tlustostěnná dvoudílná nádoba používaná v laboratoři.

1.3 Metoda Brinell

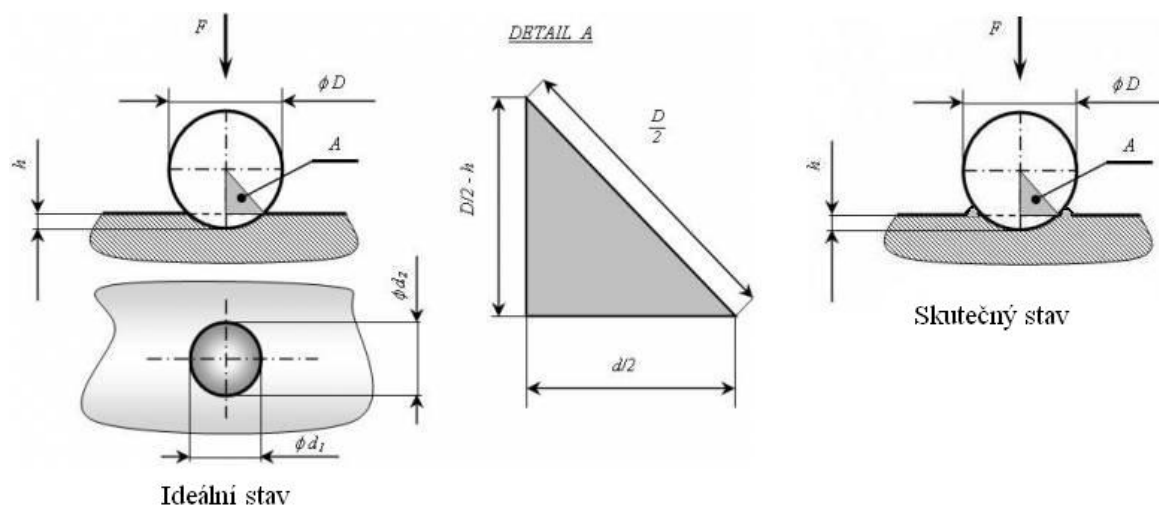
Zkouška tvrdosti těž nazývána jako metoda vtláčením kuličky, patří k nejčastěji používaným metodám měření tvrdosti polymeru. [7]

Metoda Brinell se používá pro měření tvrdosti tuhých polymerních systémů. Na rozdíl od kovů, byla tato zkouška upravena tak, že byly zvětšeny průměry kuliček a snížena síla při jejich vtláčování. [10]

1.3.1 Princip zkoušky

Princip metody je založen na vtláčování kuličky do zkoušeného materiálu. Tvrdost je vyjádřena vztahem mezi silou, kterou je vtláčena ocelová kulička do zkoušeného tělesa a velikosti důlku, který tím po určité době působení na zkušební tělese vznikne. I když metoda podle Brinella používaná pro hodnocení polymeru byla odvozena z metody pro hodnocení kovů, nelze výsledky vzájemně porovnávat.

Na obrázku 1 je nakreslen ideální stav vtláčení kuličky do zkušebního materiálu, kdy nedojde k deformaci materiálu v okolí kuličky a skutečný průběh vtláčení zkušebního tělíska do vzorku. Při reálném průběhu vtláčení kuličky do vzorku dojde k vytlačení okolního materiálu kolem kuličky a při hodnocení se tento jev zahrnuje. Po odtižení kuličky zůstane část měřené látky ireverzibilně deformována. Hloubku h pak můžeme rozložit do dvou složek, a to na složku reverzibilní h_1 a složku ireverzibilní h_2 . Deformační část reverzibilní, která je elastického nebo viskoelastického charakteru souvisí přímo s Youngovým modulem E a Poissonovou konstantou μ . Deformační část ireverzibilní je pak ve vztahu k plastickému toku. Většina metod měření používá hodnotu h a obě složky od sebe neodděluje. [7]



Obr. 1. Princip metody vtláčením kuličky [12]

Tvrдость podle Brinella v závislosti na hloubce důlku je vyhodnocována podle vzorce:

$$HB = \frac{F_r}{\pi \cdot D \cdot h_r} \quad (1)$$

kde: F_r – redukované zkušební zatížení [N],

h – hloubka důlku [mm],

D – průměr ocelové kuličky [mm],

π – Ludolfovo číslo.

Redukované zkušební zatížení F_r se vypočítá z rovnice:

$$F_r = F \cdot \frac{\alpha}{(h - h_r) + \alpha} = F \cdot \frac{0,21}{h - 0,25 + 0,21} \quad (2)$$

kde: F – zatížení působící na měřící kuličku [N],

h_r – redukovaná hloubka vtlačení, která má hodnotu 0,25mm,

h – hloubka vtlačení uvedená [mm],

α – konstanta, která má hodnotu 0,21. [4]

Jestliže se měří průměr okraje důlku d , pak platí:

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d_{1,2}^2}{4}} \quad (3)$$

kde: h – hloubka důlku [mm],

$d_{1,2}$ – aritmetický průměr průměru důlku [mm],

D – průměr ocelové kuličky [mm].

Tvrдост podle Brinella v závislosti na zjištěném průměru důlku:

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d_{1,2}^2} \right)} \quad (4)$$

kde: F – zatížení působící na měřící kuličku [N],

$d_{1,2}$ – aritmetický průměr průměru důlku [mm],

D – průměr ocelové kuličky [mm]. [7]

1.3.2 Vnikající tělesa a zkušební zatížení

Vnikající těleso je kulička, která musí být vyrobena z leštěné tvrzené oceli. Průměr kuličky spolu se zkušebním zatížením a dobou odečítání je obsaženo v tabulce 2.

Tab. 2. Průměr kuličky, zkušební zatížení a doba odečítání. [4]

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,
 - průměr důlku d mikroskopem po odlehčení.

1.3.3 Zkušební tělesa (vzorky)

Pro zkoušky tvrdosti obecně platí, že zkušební tělesa mají mít takové rozměry, aby výsledek zkoušky nebyl ovlivněn okrajovými efekty, výškou vzorku a tvrdostí podložky. Zkušební tělesa musejí mít minimální šířku 15 mm a minimální tloušťku 4 mm. Zkouší se 5 zkušebních vzorků a na každém se odečítá hodnota po 30 sekundách. [10]

1.3.4 Provedení zkoušky

Zkouška se obvykle provádí při teplotě od 10°C do 35°C. V případě, kdy chceme docílit nejpřesnějších hodnot se zkouška provádí ve stejném prostředí, jak je uvedeno v normě ČSN EN ISO 291 Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení. Při zkoušce musí být použito zkušební zatížení, které odpovídá velikosti kuličky a zkoušenému materiálu. [11]

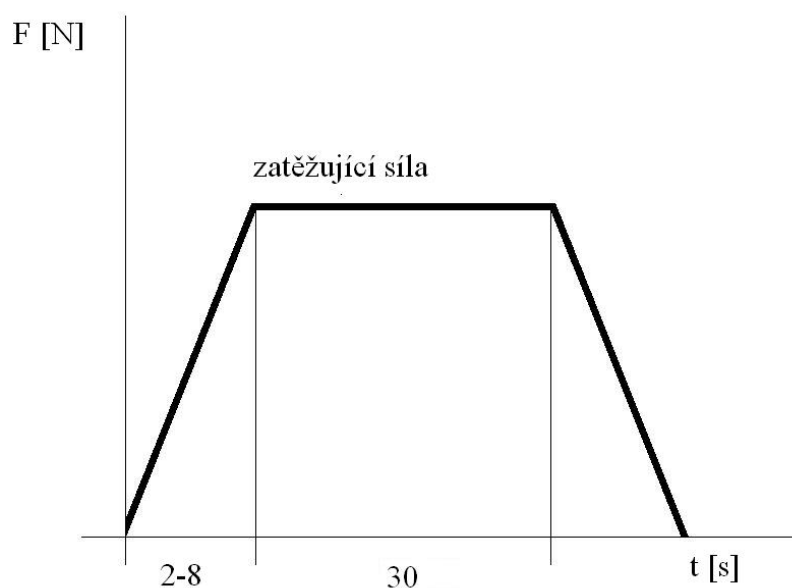
Zatěžující síla musí být zvolena tak, aby hloubka důlku se pohybovala v rozmezí $h = 0,15$ mm až 0,35 mm. Při menší hloubce než 0,15 mm se musí použít větší zatížení a naopak při větší hloubce než 0,35 mm se musí zvolit menší zatížení. Přesnost měření je závislá na přesnosti určení hloubky důlku. Používání malých průměrů kuliček vyžaduje pečlivou úpravu povrchu zkušebního vzorku, jinak vznikají poměrně velké rozdíly v naměřených hodnotách. To znamená čím menší je hloubka důlku, tím je větší chyba měření. Proto raději volíme větší průměr kuličky a tomu odpovídající zatížení.

Vzdálenost důlku od okraje zkušebního vzorku by měla být nejméně dva průměry důlku. Tloušťka zkušebního vzorku by měla být při každém měření přibližně stejná, aby byl stejný vliv pružné deformace na měřené hodnoty. [8]

Vzorek musí být položen na tvrdé podložce a je důležité, aby se během zkoušky nepohnul. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek.

Vnikající těleso vtlačuje do zkušebního vzorku zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázu a bez chvění. [11]

Aplikuje se počáteční zatížení 9,8 N. Hloubkoměr se vynuluje a aplikuje se celkové zatížení které je uvedeno v tabulce 2. Hloubka důlku se měří po 30 sekundách.



Obr. 2. Průběh zkušebního zatížení – metoda Brinell

1.3.5 Zápis hodnoty tvrdosti

Zápis tvrdosti podle Brinella je znázorněn na obrázku 3.

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

Obr. 3. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Brinella [6]

Např. 80 HB 5/49/10 - tvrdost podle Brinella o hodnotě 80 MPa, kde jsme použili kuličku o průměru 5mm, zatěžující síla byla 49N a hloubku vtisku jsme odečetli po 10 sekundách.

1.3.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Brinell

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

Při dodržení předepsaných tolerancí pro jednotlivé průměry kuliček je velikost chyby menší než 0,1%.

Při chybě měření + 1% průměru vtisku je odpovídající chyba hodnoty tvrdosti v rozmezí od -2,02% do -2,25% podle velikosti měřeného vtisku. Chyby vznikající při proměřování vtisku způsobují obvykle největší odchylky v hodnotě tvrdosti. Systematická chyba měřicího zařízení obvykle nepřesahuje hodnotu $\pm 0,5\%$ průměru vtisku. Tato chyba způsobuje při výše uvedené mezní hodnotě ($\pm 0,5\%$) odchylku v určení tvrdosti $\pm 1,02\%$ až $\pm 1,12\%$.

Do skupiny chyb způsobených nedodržením předepsaných zkušebních podmínek lze zařadit chyby vznikající v důsledku rozdílné rychlosti přísunu vnikajícího tělesa, rozdílné rychlosti vnikání, rozdílné doby působení zatěžující síly, vibrací a rázů během zkoušky, nedodržení předepsaných vzdáleností mezi jednotlivými vtisky nebo mezi vtiskem a okrajem zkoušeného vzorku, při měření na zakřivené ploše, při nedostatečné tloušťce zkoušeného vzorku. [11]

1.3.7 Související normy

Tab. 3. Přehled nejběžnějších norem pro metodu podle Brinella

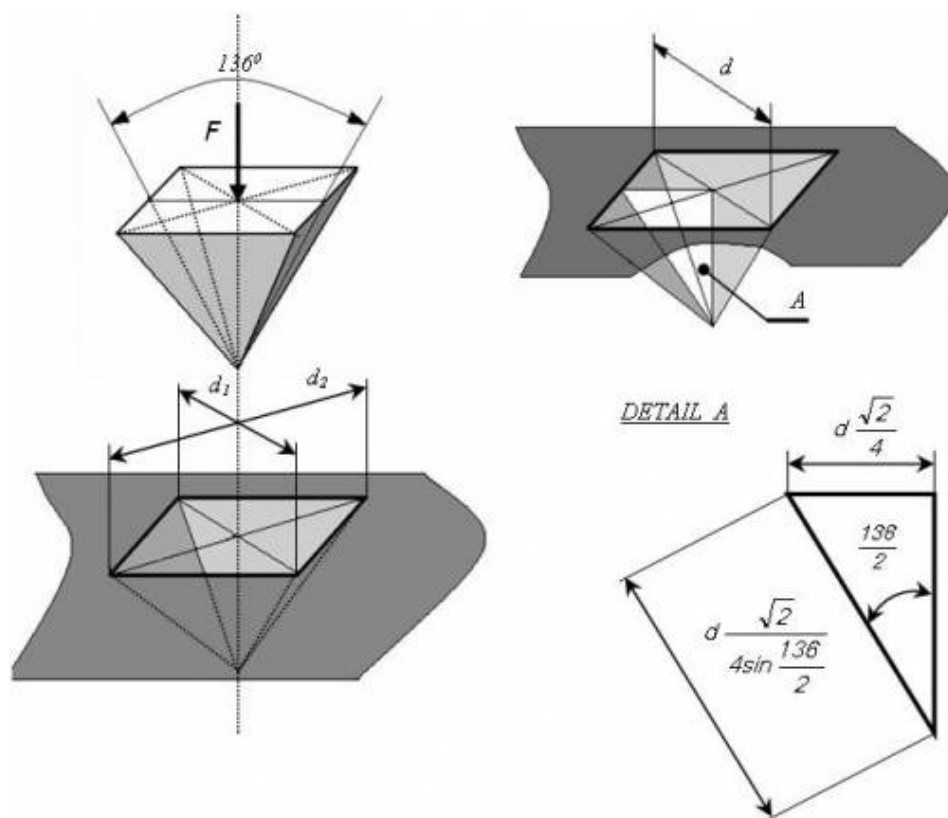
	norma	název	platnost
ČSN	ČSN EN ISO 2039 - 1	Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1: Metoda vtláčení kuličky	Srpen 2003
ISO	ISO 2039 – 1:2001	Plastics - Determination of hardness – Part 1: Ball indentation method	2001
DIN	DIN EN ISO 2039 - 1	Kunststoffe - Bestimmung der Härte - Teil 1: Kugeleindruckversuch.	Červen 2003
STN	STN EN ISO 2039 - 1	Plasty. Stanovenie tvrdosti. Časť 1: Skúška vtláčaním guľôčky	Srpen 2003
BS	BS EN ISO 2039-1:2003	Plastics. Determination of hardness. Ball indentation method	Únor 2003

1.4 Metoda Vickers

Metoda podle Vickerse je obdobná jako metoda podle Brinella. Místo ocelové kuličky se vtlačuje pravidelný čtyřboký diamantový jehlan. [7]

1.4.1 Princip metody

Zkouška tvrdosti podle Vickerse spočívá ve vtlačení diamantového jehlanu do zkušební vzorku určitým zkušebním zatížením F po stanovenou dobu a změří se úhlopříčka vtisku (zjišťujeme aritmetický průměr délek obou naměřených úhlopříček d_1 a d_2), která zůstane po odlehčení zatížení. [6]



Obr. 4. Zobrazení metody diamantovým hrotem – čtyřbokým jehlanem [12]

Tvrdotost podle Vickerse se vypočítá takto:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{1,8544 \cdot F}{d_{1,2}} \quad (5)$$

kde: F – zatěžující síla [N],

$d_{1,2}$ – aritmetický průměr úhlopříček [mm].

Obsah plochy vtisku:

$$S = \frac{d_{1,2}}{2 \cdot \sin \frac{136}{2}} \quad (6)$$

kde: S – plocha vtisku [mm²],

$d_{1,2}$ – aritmetický průměr úhlopříček [mm]. [7]

Tab. 4. Podle použitého zatížení se metoda Vickers dělí do 3 skupin [6]

Označení	Symbol tvrdosti HV	Zkušební zatížení F [N]
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	$\geq HV 5$	$F \leq 49,03$
Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení	$HV 0,2$ až $HV 5$	$1,961 \leq F \leq 49,03$
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	$HV 0,01 < HV 0,2$	$0,09807 \leq F \leq 1,961$

1.4.2 Vnikací tělesa a zkušební síly

Vnikajícím tělesem je čtyřboký diamantový jehlan, který má vrcholový úhel 136°. Zkušební zatížení se volí podle tabulky 4. Doba působení zkušebního zatížení musí být od 10 sekund do 15 sekund. U některých materiálů se může použít i delší doba. Potom se to ovšem musí zapsat do označení tvrdosti.

1.4.3 Zkušební tělesa (vzorky)

Pro zkoušky tvrdosti obecně platí, že zkušební tělesa mají mít takové rozměry, aby výsledek zkoušky nebyl ovlivněn okrajovými efekty, výškou vzorku a tvrdostí podložky. Velice důležité je dodržet minimální tloušťku zkušební vzorku. Empiricky byl nalezen mezi hloubkou vtisku h , zatížením F a minimální tloušťkou vzorku t vztah:

$$t = 1,945 \sqrt{\frac{F}{HV}} + 10h \quad (7)$$

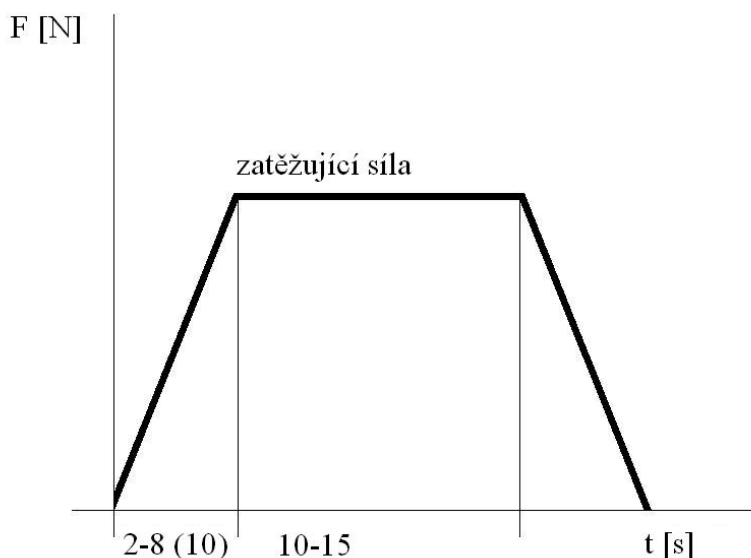
kde: F – zatěžující síla [N],

h – hloubka vtisku [mm],

HV – tvrdost metodou Vickers. [8]

1.4.4 Provedení zkoušky

Zkouška se obvykle provádí při teplotě od 10°C do 35°C. V případě, kdy chceme docílit nejpřesnějších hodnot se zkouška provádí ve stejném prostředí, jak je uvedeno v normě ČSN EN ISO 291 Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení. Při zkoušce se použije zkušební zatížení podle tabulky 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. 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 sekundy a delší než 8 sekund. Při zkouškách, kde se používá nízké zatížení nesmí celková doba překročit 10 sekund. Doba působení zatěžující síly se musí pohybovat od 10 sekund do 15 sekund. [11]



Obr. 5. Průběh zkušebního zatížení – metoda Vickers [11]

1.4.5 Zápis hodnoty tvrdosti

Zápis tvrdosti podle Vickerse je znázorněn na obrázku 6.

Hodnota tvrdosti	Symbol zkoušky	Velikost zkušebního zatížení	Doba působení zkušebního zatížení
$\frac{\perp}{XXX}$	$\frac{\perp}{HV}$	$\frac{\perp}{XXX}$	$\frac{\perp}{XX}$

Obr. 6. Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Vickerse [6]

Doba působení zkušebního zatížení se píše jen tehdy, pokud se liší od stanovené doby.

1.4.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Vickers

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

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

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 velikost těchto chyb se zvětšuje se zmenšováním velikosti vtisku.

Dovolená odchylka měřícího zařízení tvrdoměrů je $\pm 1\mu\text{m}$ pro úhlopříčky o délce menší než 0,2 mm a $\pm 0,5\%$ délky úhlopříčky pro délky větší než 0,2 mm.

Do skupiny chyb způsobených nedodržením předepsaných zkušebních podmínek lze zařadit chyby vznikající v důsledku, rozdílné rychlosti přísunu vnikacího tělesa, rozdílné doby působení zatěžující síly, mechanickým zpevněním povrchové vrstvy, oduhličením povrchové vrstvy v důsledku nežádoucího ohřevu povrchové vrstvy během přípravy vzorku, existencí povrchového napětí v místě zkoušky, vibrací a rázů během zkoušky, nedodržení předepsaných vzdáleností mezi jednotlivými vtisky nebo mezi vtiskem a okrajem zkoušeného vzorku, při měření na zakřivené ploše není započítán korekční faktor, při nedostatečné tloušťce zkoušeného vzorku. [11]

1.4.7 Související normy

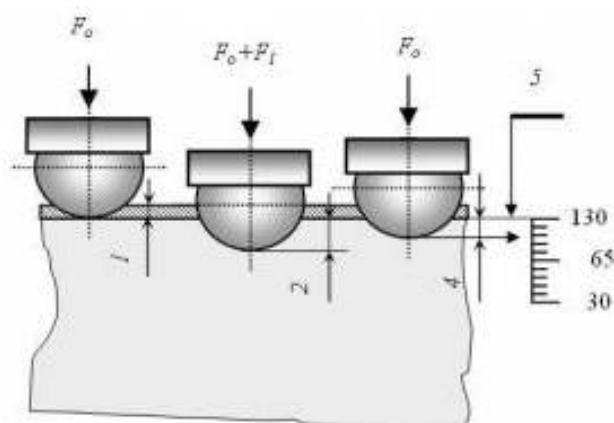
Normy ČSN, ISO, DIN, STN a BS neuvádějí pro polymery metodu dle Vickerse.

1.5 Metoda Rockwell

Hlavním kritériem u metody Rockwell pro stanovení tvrdosti není plocha vtisku, jak je tomu u Vickersovy metody, ale hloubka vtisku. Také jde o princip vtlačování zkušební tělíska do zkoušeného materiálu. Pro polymery se tato metoda používá hlavně v USA. [7]

1.5.1 Princip metody

Princip této metody spočívá v postupném (dvěma stupni zatížení) vtlačování vnikajícího tělesa do povrchu zkušební tělesa a změření trvalé hloubky vtisku h (v obrázku 7 ji uvádí kóta s číslem 4). Vnikajícím tělesem je ocelová kulička o definovaném průměru. Celkové zkušební zatížení F se skládá z předběžného zatížení F_0 a přídavného zatížení F_1 .



Obr. 7. Zobrazení metody vtlačení kuličky podle Rockwella [12]

Každý dílek Rockwellovy stupnice tvrdosti představuje svislý posun měřicí kuličky o 0,002mm. Maximální hloubka vtlačení indentoru je 0,2mm. Hodnota tvrdosti dle Rockwella je v praxi odvozena z následujícího vztahu:

$$HR = 130 - e \quad (8)$$

kde: HR – hodnota tvrdosti dle Rockwella,

e – hloubka vtlačení po odstranění přídavného zatížení; v jednotkách 0,002 mm.

Tento vztah platí pouze pro stupnice M, L, R a E. [5]

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

$$e = \frac{h}{0,002} \quad (9)$$

kde: h – trvalá hloubka vtlačení (v obrázku 7 ji uvádí kóta s číslem 4) [mm]

1.5.2 Vnikající tělesa a zkušební zatížení

Vnikající těleso je kulička, která musí být vyrobena z leštěné tvrzené oceli. Průměry kuliček spolu s předběžným zatížením, přídatným zatížením a dobou odečítání je obsaženo v tabulce 5.

Tab. 5. Hodnoty předběžného zatížení, přídatných zatížení a průměru měřící kuličky [5]

Stupnice tvrdosti dle Rockwella	Předběžné zatížení [N]	Přídatné zatížení [N]	Průměr měřící 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

Maximální povolená odchylka předběžného zatížení a přídatného zatížení je 2%. V této normě je stupnice E použita pouze pro kalibraci.

1.5.3 Zkušební tělesa (vzorky)

Zkušební tělesa je potřeba před zkouškou kondicionovat v jednom prostředí uvedeném v ČSN EN ISO 291, nebo v prostředí specifikovaném v příslušné materiálové normě.

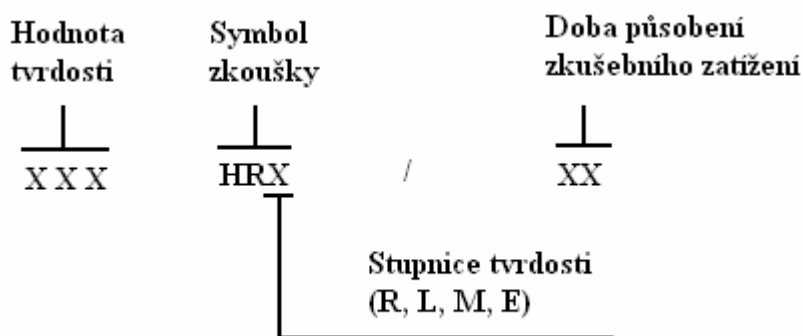
Zkušebním tělesem by měla být plochá rovná deska o minimální tloušťce 6mm. Pokud nejsme schopni splnit minimální tloušťku zkušební tělesa, tak lze zkušební těleso složit z více tenčích zkušebních těles o stejné tloušťce a ze stejného materiálu za předpokladu, že povrchy jednotlivých těles jsou zcela v kontaktu a kontakt není narušen nějakými nedokonalostmi. Zkušební vzorek nemusí být tvaru kotouče. Veškerá vtlačení musí být provedena na jednom povrchu zkušební tělesa. Po zkoušce se nesmí najít na podložce znatelný vtisk po měřícím tělisku. [5]

1.5.4 Provedení zkoušky

Zkouška se obvykle provádí při teplotě od 10°C do 35°C. V případě, kdy chceme docílit nejpřesnějších hodnot se zkouška provádí ve stejném prostředí, jak je uvedeno v normě ČSN EN ISO 291 Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení. Vzorek musí být položen na tvrdé podložce a je důležité, aby se během zkoušky nepohnul. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek. Vnikající těleso se vtlačuje do zkušební vzorku zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázu a bez chvění. Aplikuje se předběžné zatížení a číselníkový úchylkoměr se nastaví na nulu. Do 10 sekund po aplikaci předběžného zatížení se aplikuje přídavné zatížení, které se odlehčí po 15 sekundách. Po odstranění přídavného zatížení, které nastalo po 15 sekundách, se odečte na úchylkoměru nejbližší dílek stupnice. Na jednom povrchu zkušební tělesa se provede pět měření. Měření se nesmí provádět 10 mm od okraje zkušební tělesa ani od sebe navzájem. Hodnoty tvrdosti dle Rockwella by měly v ideálním případě ležet v rozsahu 50 až 115. Hodnoty které leží nad tímto rozsahem, jsou nepřesné a měření se musí opakovat s použitím přísnější stupnice. Pokud požadovaná stupnice je přísnější než stupnice R, není Rockwellova zkouška vhodná a materiál by měl být testován podle metody Shore. [5]

1.5.5 Zápis hodnoty tvrdosti

Zápis hodnoty tvrdosti je znázorněn na obrázku 8.



Obr. 8. Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Rockwella [6]

Hodnotu tvrdosti podle Rockwella nelze obecně převést na jiné tvrdosti nebo pevnost v tahu. Tyto přepočty lze používat jen tehdy, pokud jsou k dispozici spolehlivé podklady.

Například 58 HRM – tvrdost podle Rockwella měřená na stupnici M s použitím kuličky o průměru 6,35 mm.

1.5.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Rockwella

Chyba předběžného zatížení o velikosti + 2% vyvolá v závislosti na tvrdosti zkoušeného vzorku chybu hodnoty tvrdosti v rozmezí + 0,1 až + 0,3 %.(velikost odchylky je nepřímo úměrná tvrdosti zkoušeného vzorku).

Do skupiny chyb způsobených nedodržením předepsaných zkušebních podmínek lze zařadit chyby vznikající v důsledku, rozdílné rychlosti přísunu vnikajícího tělesa, rozdílná rychlost vnikání, rozdílné doby působení zatěžující síly, oduhličením povrchové vrstvy v důsledku nežádoucího ohřevu povrchové vrstvy během přípravy vzorku, nedostatečná úprava povrchu v místě zkoušky (drsnot), vibrační a rázů během zkoušky, nedodržení předepsaných vzdáleností mezi jednotlivými vtisky nebo mezi vtiskem a okrajem zkoušeného vzorku, při měření na zakřivené ploše není započítán korekční faktor při nedostatečné tloušťce zkoušeného vzorku. [11]

1.5.7 Související normy

Tab. 6. Přehled nejběžnějších norem pro metodu dle Rockwella

	norma	název	platnost
ČSN	ČSN EN ISO 2039 - 2	Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 2: Tvrdost dle Rockwella	Srpen 2003
ISO	ISO 2039 – 2:1987	Plastics - Determination of hardness – Part 2: Rockwell hardness.	1987
DIN	DIN EN ISO 2039 - 2	Kunststoffe - Bestimmung der Härte - Teil 2: Rockwellhärte	Leden 2000
STN	STN EN ISO 2039 - 2	Plasty. Stanovenie tvrdosti. Časť 2: Tvrdost dle Rockwella	Září 2001
BS	BS EN ISO 2039-2:2000	Determination of Rockwell hardness. Rockwell hardness.	Únor 1992

1.6 Metoda Shore

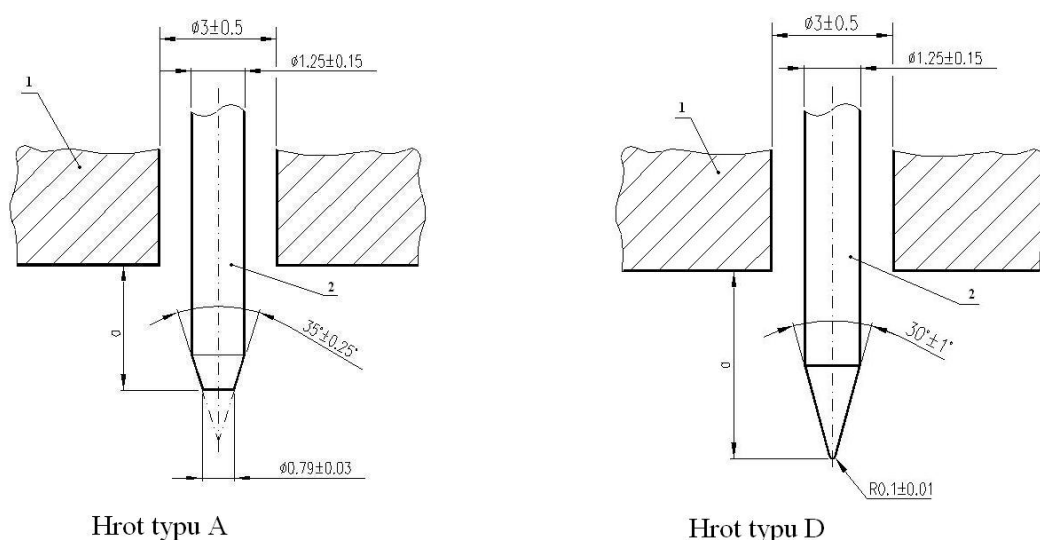
Tato metoda měření tvrdosti plastů je založena na vlačování hrotu tvrdoměru typu A, který se používá pro měkčí materiály a tvrdoměru typu D, který se používá na tvrdší materiály. Metoda umožňuje měřit tvrdost na začátku vlačování hrotu anebo po uplynutí stanovené doby nebo obojí. Používá se tehdy pokud už není vhodná stupnice R u metody dle Rockwella.

1.6.1 Princip zkoušky

Princip metody dle Shoreho spočívá v měření hloubky specifikovaného hrotu vtačeného do vzorku materiálu za stanovených podmínek. Hloubka vtačeného hrotu je nepřímě úměrná hodnotě tvrdosti.

1.6.2 Zkušební zařízení

K měření tvrdosti se použije tvrdoměr typu A nebo typu D. Tvrdoměry se skládají z opěrné patky (na obrázku 9 označeno 1), zkušebního hrotu (na obrázku 9 označeno 2), ukazatele délky a kalibrované pružiny. V opěrné patce je otvor o průměru $3\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$. Zkušební hrot patce o průměru $1,25\text{ mm} \pm 0,15\text{ mm}$ vytvořený na tyčince z kalené oceli. Na obrázku 9 je uveden tvrdoměr typu A a tvrdoměr typu D. [3]



Obr. 9. Zkušební hrot tvrdoměru typu A a typu D [3]

Ukazatel délky slouží pro odečet vysunutí špičky zkušební hrotu z opěrné patky. Může být opatřen stupnicí umožňující odečítat vysunutí přímo v jednotkách od 0 při úplném vysunutí do 100 při nulovém vysunutí.

Kalibrované pružiny působí na zkušební hrot tvrdoměru určitou silou dle rovnice 10 a 11.

$$F = 550 + 75H_A \quad (10)$$

kde : F – síla vtlačování [mN],

H_A – hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu A.

$$F = 455H_D \quad (11)$$

kde : F – síla vtlačování [mN],

H_D – hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu D. [3]

1.6.3 Zkušební tělesa (vzorky)

Minimální tloušťka zkušební tělesa musí být 4 mm. Pokud nejsme schopni splnit minimální tloušťku zkušební tělesa, tak lze zkušební těleso složit z více tenčích vrstev, aby se dosáhlo požadované tloušťky. Výsledky vícevrstevných zkušebních těles se nemusí shodovat s výsledky na zkušebních tělesech z jednoho kusu, protože u vícevrstevných vzorcích nelze docílit dokonalého kontaktu mezi jednotlivými vrstvami.

Povrch vzorku musí být rovný na dostatečně velké ploše, aby se opěrná patka tvrdoměru dotýkala vzorku na ploše o poloměru nejméně 6 mm od špičky zkušební hrotu. Měření tvrdosti není možné provádět na zkušebních vzorcích s nerovným, zaobleným nebo drsným povrchem.

1.6.4 Provedení zkoušky

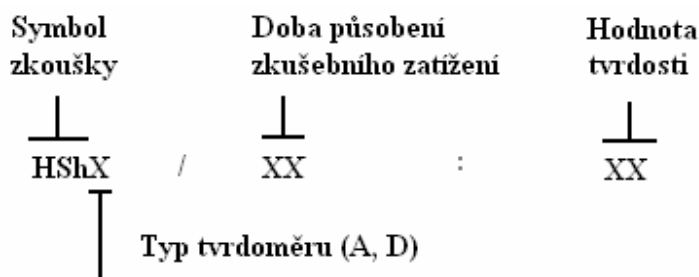
Zkušební těleso se položí na tvrdý rovný vodorovný povrch. Tvrdoměr se přiloží kolmo na zkušební těleso tak, aby špička zkušební hrotu byla od kteréhokoli okraje zkušební tělesa vzdálena nejméně 9 mm. Na zkušební těleso se co nejrychleji a bez nárazu přitlačí opěrná patka, přičemž musí být stále rovnoběžná s povrchem zkušební tělesa. Tlak se volí právě dostačujícímu k tomu, aby došlo k pevnému kontaktu mezi zkušebním tělesem a opěrnou patkou. [3]

Tvrdot se odečítá na stupnici přístroje po uplynutí určené doby. Je-li požadovaná počáteční hodnota tvrdosti, tak se odečítá hodnota do 1 sekundy po docílení pevného kontaktu mezi zkušebním tělesem a opěrnou patkou. Pokud má tvrdoměr ukazatel maximální hodnoty, tak se odečte maximální hodnota.

Na různých místech zkušebního tělesa vzdálených od sebe nejméně 6 mm se provede pět měření a stanoví se z něj aritmetický průměr. [3]

1.6.5 Zápis hodnoty tvrdosti

Zápis hodnoty tvrdosti je znázorněn na obrázku 10.



Obr. 10. Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Shore

Například: tvrdost HShA / 15:55 – kde A je typ tvrdoměru, 15 je doba v sekundách mezi okamžikem uvedení opěrné desky do pevného kontaktu se zkušebním tělesem a provedením odečtu, 55 je hodnota tvrdosti.

1.6.6 Související normy

Tab. 7. Přehled nejběžnějších norem pro metodu Shore

	norma	název	platnost
ČSN	ČSN EN ISO 868	Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtláčováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)	Říjen 2003
ISO	ISO 868:2003	Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)	Duben 2003
DIN	DIN EN ISO 868	Kunststoffe und Hartgummi - Bestimmung der Eindruckhärte mit einem Durometer (Shore-Härte).	Říjen 20003
STN	STN EN ISO 868	Plasty a ebonit. Stanovenie tvrdosti vtláčaním pomocou tvrdomera (Shorova tvrdosť) (ISO 868: 2003).	Květen 2004
BS	BS EN ISO 868:2003	Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)	Duben 2003

1.7 Metoda IRHD

Tato metoda tvrdosti nám slouží k rychlému změření tuhosti pryže. Tvrdost je měřena z hloubky vtlačení indentoru zatížen specifikovanou silou v pryžovém zkušebním tělese. Popíšeme čtyři metody pro stanovení tvrdosti vulkanizovaných nebo termoplastických pryží s plochými povrchy, což je standardní metoda měření této tvrdosti a čtyři metody pro stanovení zdánlivé tvrdosti zakřivených povrchů nazývaní se metoda měření zdánlivé tvrdosti. Tvrdost je vyjádřena v mezinárodních stupních tvrdosti pryže (IRHD). Rozsah této metody tvrdosti je od 10 IRHD po 100 IRHD.

1.7.1 Princip zkoušky

Tato metoda spočívá v měření rozdílu mezi hloubkou vtlačení kuličky do pryže při malé, kontaktní síle a velké (vtlačovací) síle. Tato zkouška se dělí na standardní metody měření tvrdosti a měření zdánlivé tvrdosti.

Standardní metody měření tvrdosti

Tyto metody se rozdělují na N, H, L a M a jsou prováděny na zkušebních tělesech standardní tloušťky a dále specifikovanými nejmenší velikostí.

Metoda N nazývaní se normální zkouška je metoda vhodná pro pryže o tvrdosti v rozsahu 35 IRHD až 85 IRHD, ale připouští se použít v rozsahu tvrdosti 30 IRHD až 95 IRHD.

Metoda H je zkouška pro vysoké tvrdosti a je vhodná pro pryže o tvrdosti v rozsahu 85 IRHD až 100 IRHD.

Metoda L je zkouška pro nízké tvrdosti a je vhodná pro pryže o tvrdosti v rozsahu 10 IRHD až 35 IRHD.

Metoda M zvaná mikrozkouška je v podstatě zmenšenou verzí normální zkušební metody N, umožňující zkoušení tenkých a malých zkušebních těles. Je vhodná pro pryže o tvrdosti v rozsahu od 35 IRHD až 85 IRHD. [1]

Metody měření zdánlivé tvrdosti

Pro zkoušky zdánlivé tvrdosti jsou specifikovány čtyři metody CN, CH, CL a CM. Tyto metody jsou modifikacemi metod N, H, L a M. Metoda měření zdánlivé tvrdosti je specifická tím, že se neprovádí na speciálním zkušebním vzorku se specifickými rozměry, ale provádí se na hotovém výrobku. Plocha hotového výrobku může být zakřivená, tloušťka pryže

je různá a ve většině případů boční rozměry neodpovídají nejmenší povolené vzdálenosti. Hodnoty stanovené na výrobcích se proto obecně neshodují s hodnotami stanovenými na standardních zkušebních tělesech.

1.7.2 Vnikací tělesa a zkušební síly

Rozměry zkušebního zařízení a použité síly jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8. Rozměry zkušebního zařízení a použité síly [1]

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	$0,3 \pm 0,02$	$5,4 \pm 0,01$	$5,7 \pm 0,03$	$8,3 \pm 1,5$
Metoda H (vysoká tvrdost)	Kulička $1,00 \pm 0,01$ Patka 20 ± 1 Otvor 6 ± 1	$0,3 \pm 0,02$	$5,4 \pm 0,01$	$5,7 \pm 0,03$	$8,3 \pm 1,5$
Metoda L (nízká tvrdost)	Kulička $5,00 \pm 0,01$ Patka 22 ± 1 Otvor 10 ± 1	$0,3 \pm 0,02$	$5,4 \pm 0,01$	$5,7 \pm 0,03$	$8,3 \pm 1,5$
Metoda M (mikrozkouška)	[mm]	[mN]	[mN]	[mN]	[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

1.7.3 Zkušební tělesa (vzorky)

Pro zkušební tělesa všeobecně platí, že horní a spodní povrchy musí být ploché, hladké a navzájem paralelní. Zkušební tělesa pro srovnávání tvrdosti musí být vyrobena o stejné tloušťce.

Standardní zkušební tělesa pro metodu N a H musí mít tloušťku 8 mm až 10 mm a musí být vytvořena vrstvami pryže. Nejtenčí vrstva nesmí mít tloušťku menší než 2 mm. Nestandardní zkušební tělesa mohou být tlustší nebo tenčí, ale jejich tloušťka nesmí být menší než 4 mm. V tabulce 9 je znázorněna minimální vzdálenost bodu měření od okraje zkušebního tělesa.

Pro metodu L je tloušťka standardního zkušebního tělesa 10 mm až 15 mm a musí být tvořena vrstvami pryže, z nichž nejtenčí nesmí mít tloušťku menší než 2 mm. Nestandardní zkušební tělesa mohou být tlustší nebo tenčí, ale jejich tloušťka nesmí být menší než 6 mm. V tabulce 9 je znázorněna minimální vzdálenost bodu měření od okraje zkušebního tělesa.

Tab. 9. Minimální vzdálenosti bodu měření od okrajů vzorků pro metody N, H a L [1]

Celková tloušťka zkušební tělesa [mm]	Minimální vzdálenost bodu měření od okrajů zkušební tělesa [mm]
4	7
6	8
8	9
10	10
15	11,5
25	13

Standardní zkušební tělesa pro metodu M musí mít tloušťku $2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Tlustší nebo tenčí zkušební těleso je povoleno použít, ale nesmí mít tloušťku menší než 1 mm. Boční rozměry musí zaručovat, že zkouška nebude provedena v menší vzdálenosti než 2 mm od okrajů. [1]

1.7.4 Provedení zkoušky

Horní a spodní povrch zkušební vzorku se jemně popráškuje separačním práškem (vhodný je například mastek). Zkušební vzorek se umístí na tuhý vodorovný povrch a přítlačná patka se spustí na povrch tělesa. Na dobu 5 sekund se přiloží kontaktní silou indentor s kuličkou.

Pokud je stupnice pro měření hloubky vtláčení indentoru dělaná přímo v mezinárodních stupnicích tvrdosti pryže (IRHD), je nutno po uplynutí 5 sekund působení kontaktní síly nastavit stupnici na hodnotu 100. Potom se po dobu 30 sekund nechá působit vtláčovací zatížení a přímo se odečte na stupnici tvrdost v mezinárodních stupních tvrdosti pryže.

Pokud je stupnice pro měření hloubky vtláčení dělaná v metrických jednotkách, zaznamená se rozdíl hodnot vtláčení indentoru při působení přidaného vtláčovacího zatížení po uplynutí 30 sekund v setinách milimetru. Tento rozdíl se převede na mezinárodní stupně tvrdosti pryže pomocí tabulek nebo grafů.

Každé měření musí být provedeno minimálně ve třech různých bodech rozmístěných po zkušebním vzorku vzdálených od sebe minimálně 6 mm.

1.7.5 Zázpis hodnoty tvrdosti

Tvrдост se vyjádří jako střední hodnota jednotlivých měření zaokrouhlená na nejbližší celé číslo v mezinárodních stupnicích tvrdosti pryže označena symbolem °. [1]

Například: 70°, SN – střední hodnota 70, provedena na tělesa standardních rozměrů metodou N pro normální zkoušku,

28°, 8 x 25 mm, L – střední hodnota 28, provedena na tělese pro zkoušení nestandardních zkušebních těles s tloušťkou a menšími bočními rozměry metodou L pro nízkou tvrdost,

95°, CH – střední hodnota 95, zkouška provedena na zakřiveném povrchu metodou H pro vysokou tvrdost.

1.7.6 Související normy

Tab. 10. Přehled nejběžnějších norem pro metodu IRHD

	norma	název	platnost
ČSN	ČSN ISO 48	Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tvrdosti (tvrdost mezi 10 IRHD a 100 IRHD)	Listopad 2008
ISO	ISO 48:2007	Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of hardness (hardness between 10 IRHD and 100 IRHD)	Srpen 2007
DIN	DIN ISO 48	Elastomere und thermoplastische Elastomere - Bestimmung der Härte (Härte zwischen 10 IRHD und 100 IRHD).	Říjen 2009
STN	STN ISO 48	Guma alebo termoplastické elastoméry. Stanovenie tvrdosti (tvrdosť od 10 IRHD do 100 IRHD).	Leden 1998
BS	BS ISO 48:2007	Rubber, vulcanized or thermoplastic. Determination of hardness (hardness between 10 IRHD and 100 IRHD)	Srpen 2007

1.8 Některé další metody měření tvrdosti

V následujících kapitolách budou stručně popsány některé další metody měření tvrdosti.

1.8.1 Tvrdost podle Mohse

Tvrdost podle Mohse je tvrdost nerostu ze stupnice, v níž jsou jednotlivé nerosty seřazeny podle stupnice tvrdosti. Tvrdost se určí postupným rýpáním ostrou hranou nerostu a zkoušeného materiálu tak dlouho, až se materiál s použitým nerostem nedá rýpat. To 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 o 0,5 vyšším, než je nižší člen. V tabulce 11 je obsažena stupnice podle Mohse. [7]

Tab. 11. Mohsova stupnice tvrdosti [7]

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

Tato metoda se pro polymery téměř nepoužívá. Nedostatkem je, že se hodnoty nedostávají ve fyzikálních veličinách.

1.8.2 Tvrdost lehčených polymerů

K měření tvrdosti lehčených polymerů, jako například napěněný polyuretan, pěnové PVC a další polymery s dutinami, nelze použít metodu vlačování kuličky nebo kužele. Proto byla normalizována metoda vlačování kotouče do zkušební vzorku za přesných podmínek. Kotouč definovaného rozměru je vlačován do zkušební tělesa trhacím přístrojem stejnosměrnou rychlostí a zjišťuje se síla k dosažení vlačení o 40% počáteční tloušťky. Průběh deformace při stanovení tuhosti je možné vyhodnotit graficky tak, že se do grafu vynáší síla k dosažení vlačení odpovídající stlačení 25, 40, 50 a 65%. [7]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro experimentální část bylo vybráno celkem deset různých druhů polymerů z polyamidové a polyesterové skupiny. Z polyamidové skupiny Polyamid 6 (PA 6), Polyamid 6.6 (PA 6.6), Polyamid 11 (PA 11), Polyamid 12 (PA 12), Polyamid 66 (PA 66). Z polyesterové skupiny Polybutyltereftalát (PBT), Polykarbonát (PC), Polykarbonát s 20% skelných vláken (PC GF20), Polykarbonát s 30% skelných vláken (PC GF30) a Polykarbonát regranulát (PC regranulát). Na zvolených typech polymerů byly zvoleny a provedeny různé typy zkoušek tvrdosti. Zvolené metody byly metoda Shore D (ČSN EN ISO 868) a BIM (pro zatížení 132 N, 358 N, 961 N, ČSN EN ISO 2039 - 1).

2.1 Určování tvrdosti

Pro praktické měření tvrdosti byly použity tvrdoměry firmy AFFRI, které jsou k dispozici na Ústavu výrobního inženýrství. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

2.1.1 Měřící zařízení

Měření tvrdosti bylo prováděno na tvrdoměru OMAG Affri ART 13, na kterém byla realizována zkouška Shore se sondou D (obr. 12) a na univerzálním tvrdoměru Affri integral 2E (obr. 13). Na tvrdoměru Affri intergral 2E byly realizovány zkoušky tvrdosti vtláčením kuličky (BIM).



Obr. 11. OMAG Affri ART 13

Obr. 12. *Afri integral 2E*

2.1.2 Vyhodnocení tvrdosti

Výsledné hodnoty byly zprůměrnovány pomocí aritmetického vzorce:

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

kde: \bar{x} – aritmetický průměr,

x_i – i-tá hodnota měřené veličiny,

n – počet měření.

Vzorec pro výpočet střední kvadratické chyby aritmetického průměru:

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

kde: s – empirická směrodatná odchylka,

\bar{x} – aritmetický průměr,

x_i – i -tá hodnota měřené veličiny,

n – počet měření.

2.2 Polyamidy

Polyamidy jsou lineární polymery obsahující v řetězcích amidové skupiny (-CONH-). Nejvýznamnější a nejrozšířenější jsou polyamidy s alifatickými řetězci, na trhu jsou však i typy aromatické.

2.2.1 Polyamid 6 (PA 6)

Polyamid 6 se vyrábí z kyseliny 6-aminokapronové. Tento polymer je houževnatý, odolný proti oděru a je navlhavý. Trvale použitelný od -30°C do 100°C . Používá se v textilním průmyslu a vyrábějí se z něj technické dílce (ozubená kola a ovládací elementy). Dobře se zpracovává všemi běžnými způsoby (vstřikování, vytlačování, vyfukování). [13]

Měření tvrdosti podle Shore D u polymeru PA 6

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byla vybrána metoda s označením D, vnikací těleso (indenter) s kuželovým hrotem. Zkušební těleso z PA 6 bylo změřeno desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Tab. 12. Hodnoty pro PA 6 naměřené zkouškou Shore D

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HShD	67,8	66,9	66,3	67,1	66,5	67,3	69,6	68,5	69,7	66,7	67,6

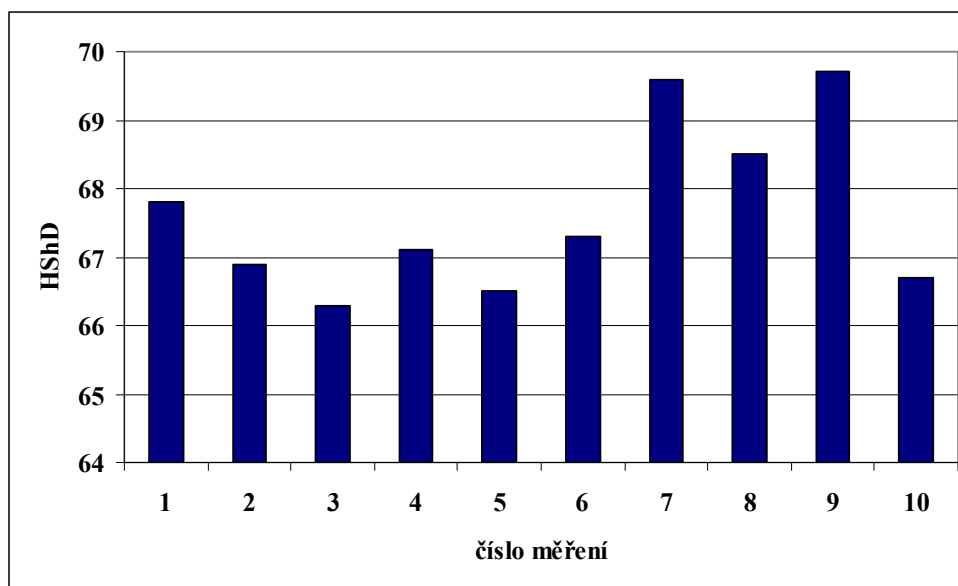
$$s = 0,39 \text{ HShD}$$

n – číslo měření

HShD – tvrdost Shore D

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 13. Naměřené hodnoty pro PA 6 zkouškou Shore D

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou Shore D pro PA 6 je $67,6 \pm 0,39$ HShD (tab. 12 a obr. 13).

Měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky (BIM) u polymeru PA 6

Pro měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky byly vybrány metody, kde zkušební těleso (indenter) byla kulička o průměru 5 mm, předběžné zatížení bylo 9,8 N a celkové zatížení v prvním případě bylo 132 N, v druhém případě 358 N a ve třetím případě 961 N. Vzorek z PA 6 byl změřen desetkrát na jednotlivých místech zkušebního vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

V tabulce 13 a na obrázku 14 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 132 N pro PA 6.

Tab. 13. Hodnoty pro PA 6 naměřené zkouškou HB 5/132/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	76,49	71,74	72,75	76,99	74,27	87,70	84,38	78,58	72,82	80,10	77,58

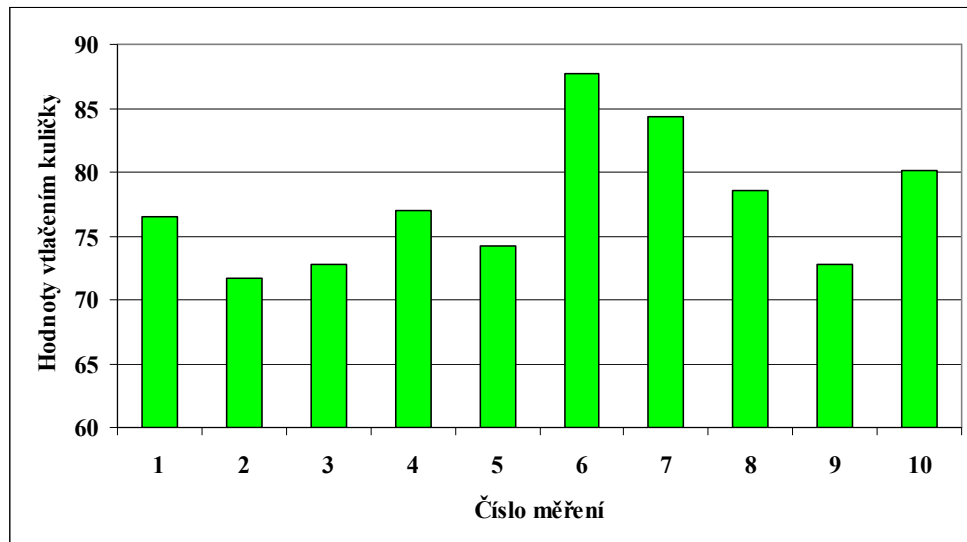
s = 1,66 HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 14. Naměřené hodnoty pro PA 6 zkouškou HB 5/132/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 132 N pro PA 6 je **77,58 ± 1,66 HB** (tab. 13 a obr. 14).

V tabulce 14 a na obrázku 15 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 358 N pro PA 6.

Tab. 14. Hodnoty pro PA 6 naměřené zkouškou HB 5/358/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	73,63	75,15	73,17	75,67	74,09	72,69	72,64	73,8	76,51	74,83	74,22

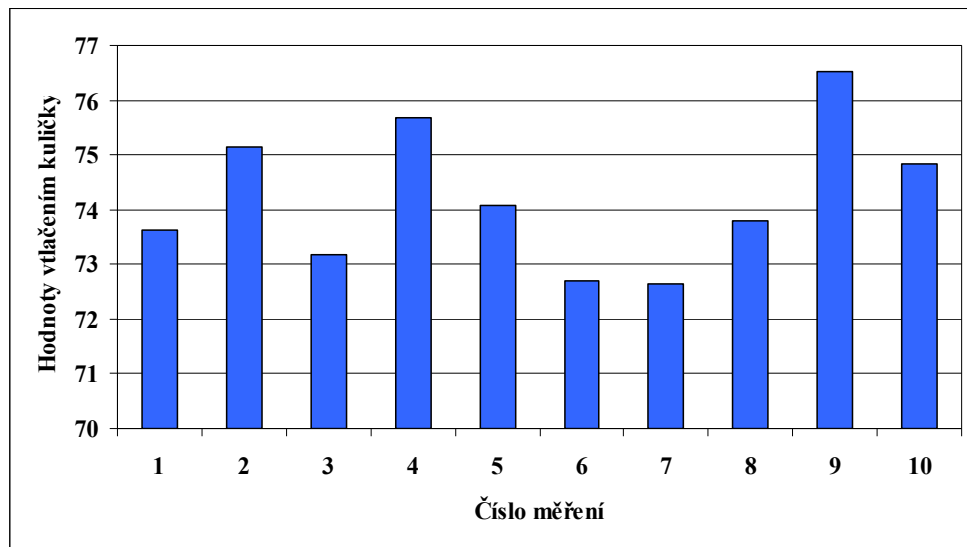
s = 0,41 HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 15. Naměřené hodnoty pro PA 6 zkouškou HB 5/358/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 358 N pro PA 6 je **74,22 ± 0,41 HB** (tab. 14 a obr. 15).

V tabulce 15 a na obrázku 16 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 961 N pro PA 6.

Tab. 15. Hodnoty pro PA 6 naměřené zkouškou HB 5/961/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	78,40	73,92	69,38	71,24	79,71	74,05	78,65	80,18	78,26	77,70	76,15

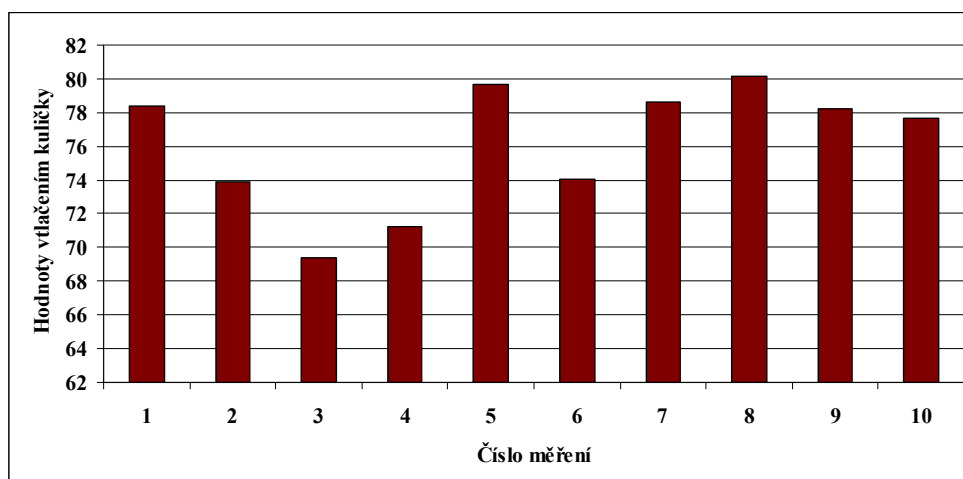
$s = 1,18$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

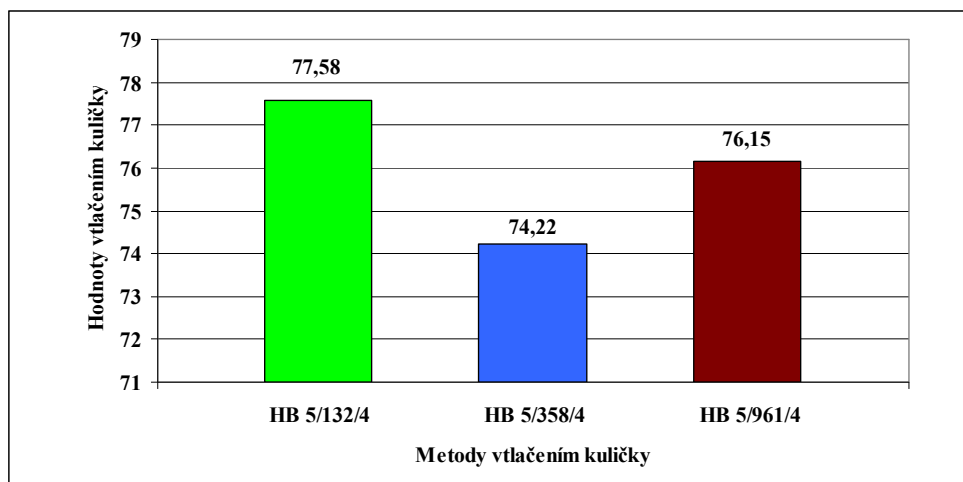
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 16. Naměřené hodnoty pro PA 6 zkouškou HB 5/961/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 961 N pro PA 6 je **76,15 ± 1,18 HB** (tab. 15 a obr.16).

Na obrázku 17 jsou porovnány výsledné hodnoty pro PA 6 metodou vtláčením kuličky získané aritmetickým průměrem.



Obr. 17. Porovnání tvrdosti PA 6 metodou vtláčením kuličky

2.2.2 Polyamid 6.6 (PA 6.6)

Polyamid 6.6 je v anglosaské literatuře také nazýván jako nylon 6.6. Tento polymer má vysokou nasákavost, dobré kluzné vlastnosti, vysokou odolnost proti otěru a výbornou tuhost a pevnost při delších vyšších provozních teplotách (trvale použitelný do 90°C). Používá se hlavně v textilním průmyslu. [13]

Měření tvrdosti podle Shore D u polymeru PA 6.6

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byla vybrána metoda s označením D, vnikací těleso (indenter) s kuželovým hrotem. Zkušební těleso z PA 6.6 bylo změřeno desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Tab. 16. *Hodnoty pro PA 6.6 naměřené zkouškou podle Shore D*

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HShD	78,2	77,1	77	75,7	73,8	73,3	73,9	75,8	77,9	78	76,1

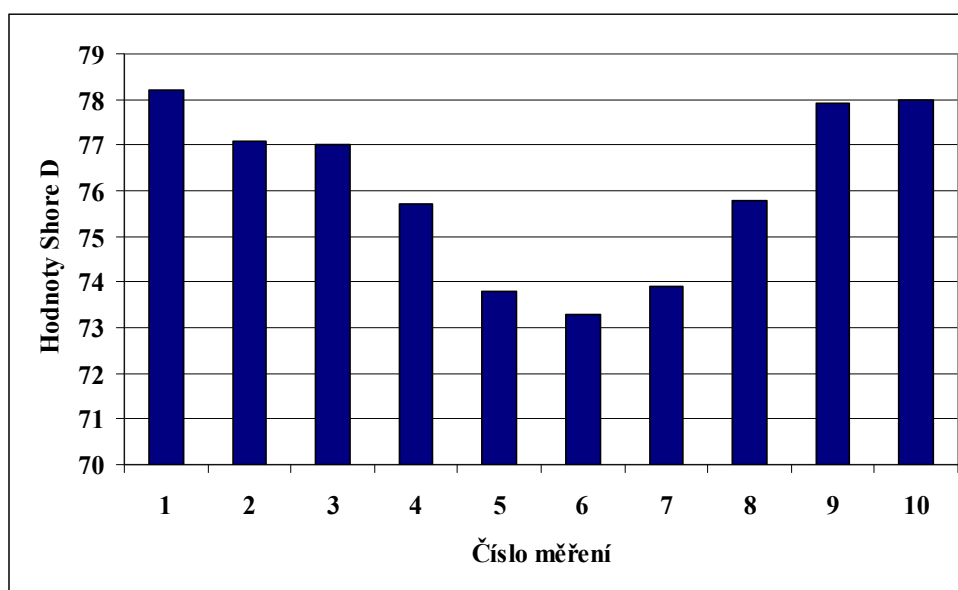
$$s = 0,59 \text{ HShD}$$

n – číslo měření

HShD – tvrdost Shore D

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 18. *Naměřené hodnoty pro PA 6.6 zkouškou Shore D*

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou Shore D pro PA 6.6 je $76,1 \pm 0,59 \text{ HShD}$ (tab. 16 a obr. 18).

Měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky (BIM) u polymeru PA 6.6

Pro měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky byly vybrány metody, kde zkušební těleso (indenter) byla kulička o průměru 5 mm, předběžné zatížení bylo 9,8 N a celkové zatížení

v prvním případě bylo 132 N, v druhém případě 358 N a ve třetím případě 961 N. Vzorek z PA 6.6 byl změřen desetkrát na jednotlivých místech zkušebního vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

V tabulce 17 a na obrázku 19 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 132 N pro PA 6.6.

Tab. 17. Hodnoty pro PA 6.6 naměřené zkouškou HB 5/132/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	282,35	251,83	247,68	314,57	207,92	234,36	207	242,32	270,04	180,67	243,87

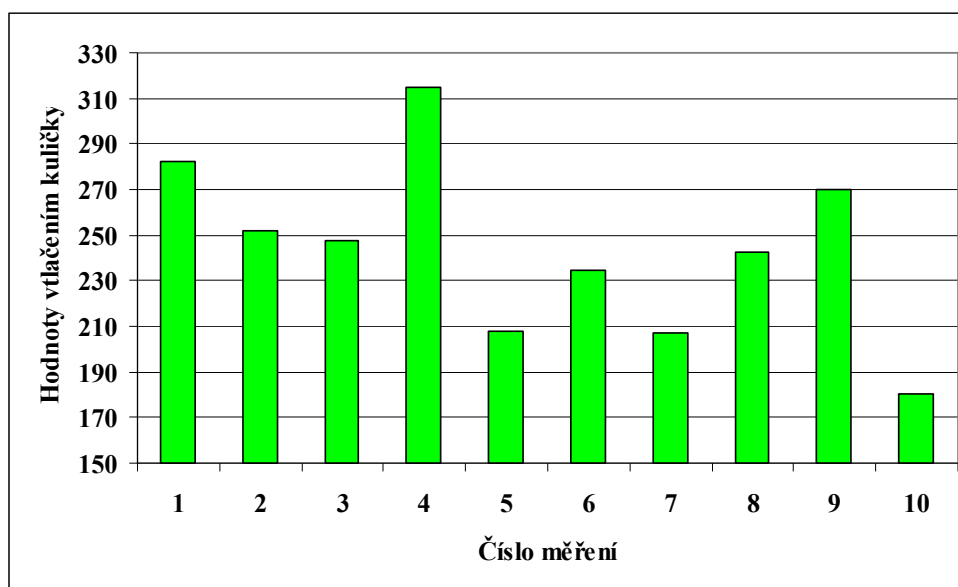
$s = 12,46$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 19. Naměřené hodnoty pro PA 6.6 zkouškou HB 5/132/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 132 N pro PA 6.6 je **243,87 ± 12,46 HB** (tab. 17 a obr. 19).

V tabulce 18 a na obrázku 20 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 358 N pro PA 6.6.

Tab. 18. *Hodnoty pro PA 6.6 naměřené zkouškou HB 5/358/4*

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	166,72	186,59	169,03	184,38	176,19	180,52	186,34	175,27	167,27	178,04	177,04

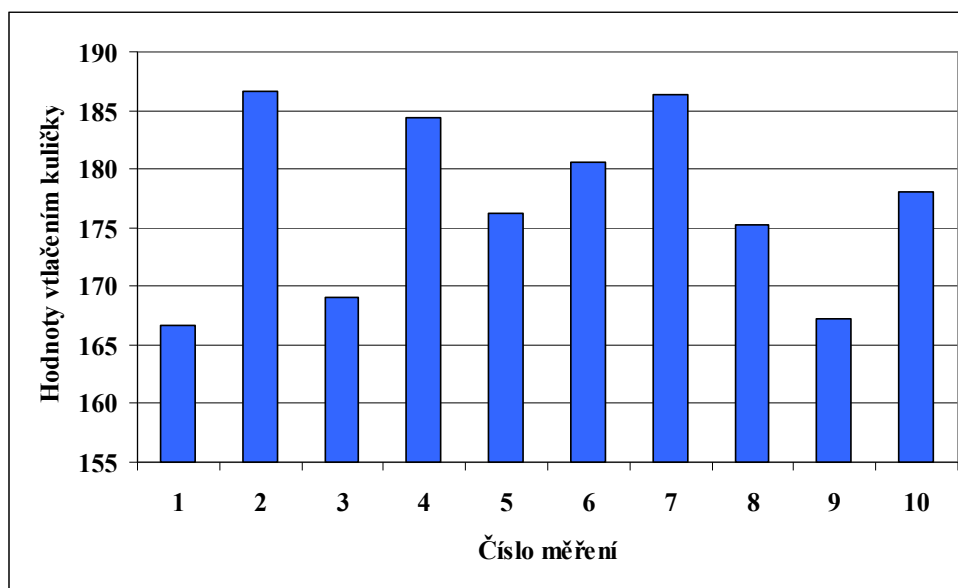
$s = 2,39$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 20. *Naměřené hodnoty pro PA 6.6 zkouškou HB 5/358/4*

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 358 N pro PA 6.6 je **177,04 ± 2,39 HB** (tab. 18 a obr. 20).

V tabulce 19 a na obrázku 21 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 961 N pro PA 6.6.

Tab. 19. *Hodnoty pro PA 6.6 naměřené zkouškou HB 5/961/4*

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	186,50	184,41	185,51	185,32	181,26	183,96	183,73	180,15	183,76	187,12	184,17

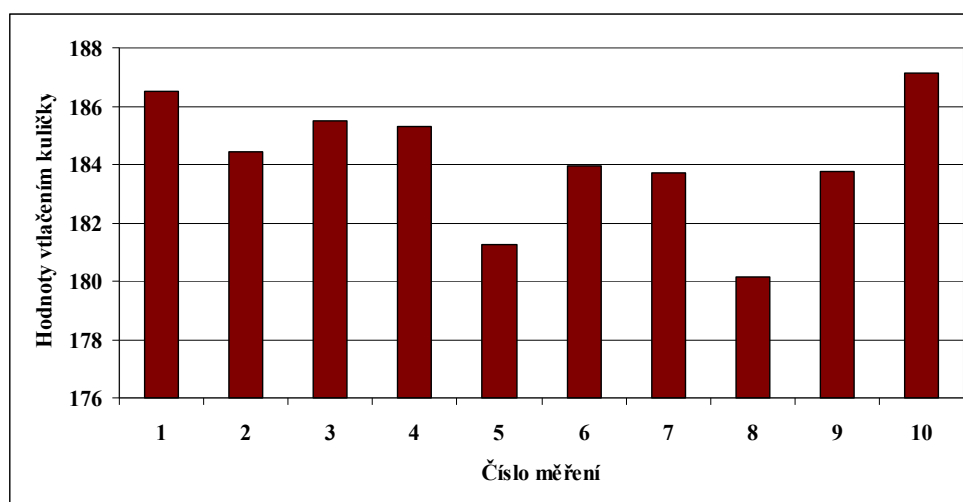
$s = 0,68$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

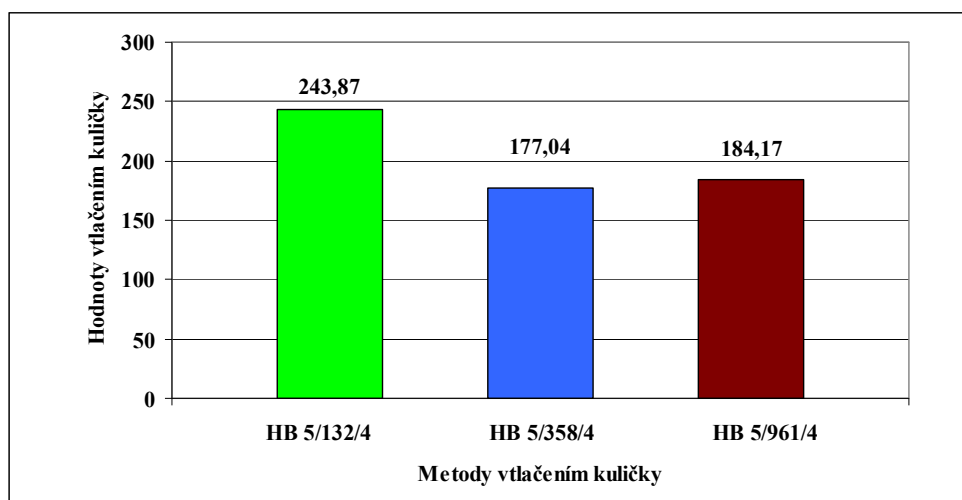
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 21. *Naměřené hodnoty pro PA 6.6 zkouškou HB 5/961/4*

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 961 N pro PA 6.6 je **184,17 ± 0,68 HB** (tab. 19 a obr. 21).

Na obrázku 22 jsou porovnány výsledné hodnoty pro PA 6.6 metodou vtláčením kuličky získané aritmetickým průměrem.



Obr. 22. Porovnání tvrdosti PA 6.6 metodou vtláčením kuličky

2.2.3 Polyamid 11 (PA 11)

Polyamid 11 se vyrábí z kyseliny aminoundekanové. Tento polymer je málo navlhavý, odolný vůči chemickým činidlům. Trvale použitelný do 90°C. Používá se hlavně na antikorozní povlaky na kovy a vyrábějí se z něj technické dílce. Dobře se zpracovává všemi běžnými způsoby (vstřikování, vytlačování, vyfukování). [13]

Měření tvrdosti podle Shore D u polymeru PA 11

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byla vybrána metoda s označením D, vnikací těleso (indenter) s kuželovým hrotem. Zkušební těleso z PA 11 bylo změřeno desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Tab. 20. Hodnoty pro PA 11 naměřené zkouškou podle Shore D

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HShD	71,9	70,7	70,2	72	70,6	70,7	70,2	70	69,9	70	70,6

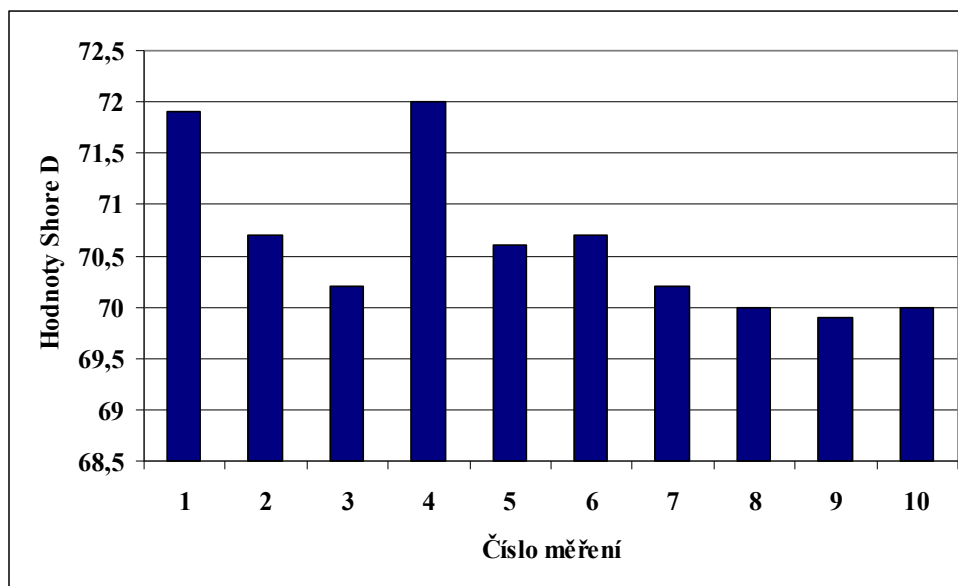
$$s = 0,24 \text{ HShD}$$

n – číslo měření

HShD – tvrdost Shore D

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 23. Naměřené hodnoty pro PA 11 zkouškou Shore D

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou Shore D pro PA 11 je $70,6 \pm 0,24$ HShD (tab. 20 a obr. 23).

Měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky (BIM) u polymeru PA 11

Pro měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky byly vybrány metody, kde zkušební těleso (indentor) byla kulička o průměru 5 mm, předběžné zatížení bylo 9,8 N a celkové zatížení v prvním případě bylo 132 N, v druhém případě 358 N a ve třetím případě 961 N. Vzorek z PA 11 byl změřen desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

V tabulce 21 a na obrázku 24 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 132 N pro PA 11.

Tab. 21. Hodnoty pro PA 11 naměřené zkouškou HB 5/132/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	100,34	101,22	89,43	98,43	97,14	104,64	106,05	123,26	111,96	107,11	103,96

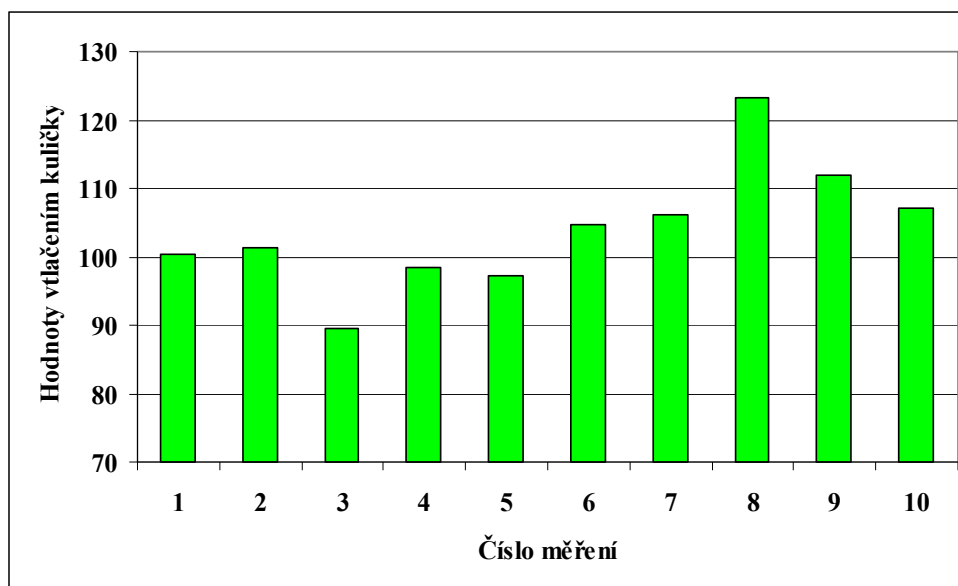
s = 2,90 HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 24. Naměřené hodnoty pro PA 11 zkouškou HB 5/132/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 132 N pro PA 11 je **103,96 ± 2,90 HB** (tab. 21 a obr 24).

V tabulce 22 a na obrázku 25 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 358 N pro PA 11.

Tab. 22. Hodnoty pro PA 11 naměřené zkouškou HB 5/358/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	90,56	93,82	92,43	91,5	94,34	95,71	93,17	96,21	90,32	93,56	93,16

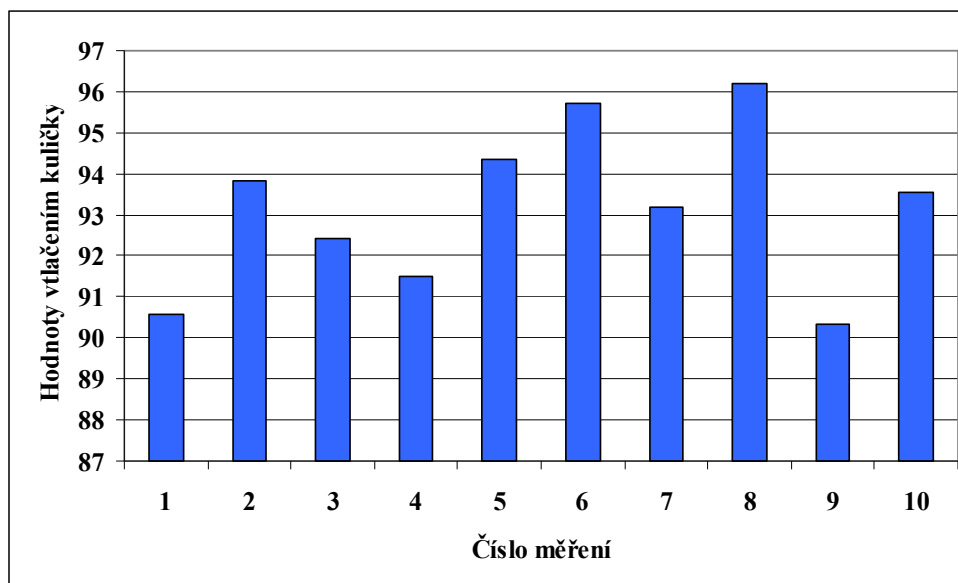
s = 0,63 HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 25. Naměřené hodnoty pro PA 11 zkouškou HB 5/358/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 358 N pro PA 11 je **93,16 ± 0,63 HB** (tab. 22 a obr. 25).

V tabulce 23 a na obrázku 26 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 961 N pro PA 11.

Tab. 23. Hodnoty pro PA 11 naměřené zkouškou HB 5/961/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	96,74	94,25	93,89	94,53	93,4	96,07	95,29	95	95,74	95,16	95,05

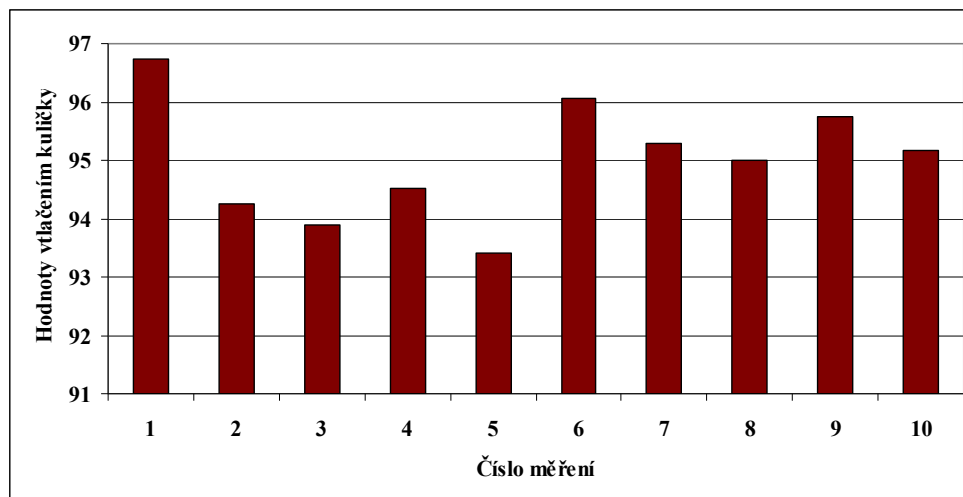
$s = 0,32$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

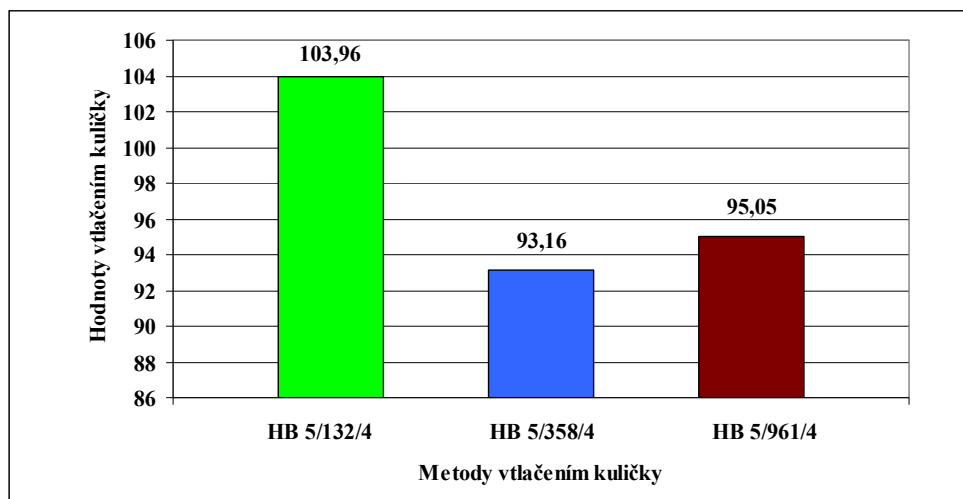
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 26. Naměřené hodnoty pro PA 11 zkouškou HB 5/961/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 961 N pro PA 11 je $95,05 \pm 0,32$ HB (tab. 23 a obr. 26).

Na obrázku 27 jsou porovnány výsledné hodnoty pro PA 11 metodou vtláčením kuličky získané aritmetickým průměrem.



Obr. 27. Porovnání tvrdosti PA 11 metodou vtláčením kuličky

2.2.4 Polyamid 12 (PA 12)

Polyamid 12 se vyrábí polymerací lauryllaktamu. Tento polymer je málo navlhavý, velmi houževnatý a trvale použitelný od -70 do 80°C . Používá se hlavně na technické součástky s vyšší houževnatostí, dobrými kluznými vlastnostmi, odolnostmi proti opotřebení a odolností vůči korozi pod napětím. Zpracovává se vstřikováním a vytlačováním. [13]

Měření tvrdosti podle Shore D u polymeru PA 12

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byla vybrána metoda s označením D, vnikací těleso (indenter) s kuželovým hrotem. Zkušební těleso z PA 12 bylo změřeno desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Tab. 24. Hodnoty pro PA 12 naměřené zkouškou podle Shore D

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HShD	64,6	65,2	64,1	65,8	64,7	64,1	65,6	65,9	65,5	65,4	65,1

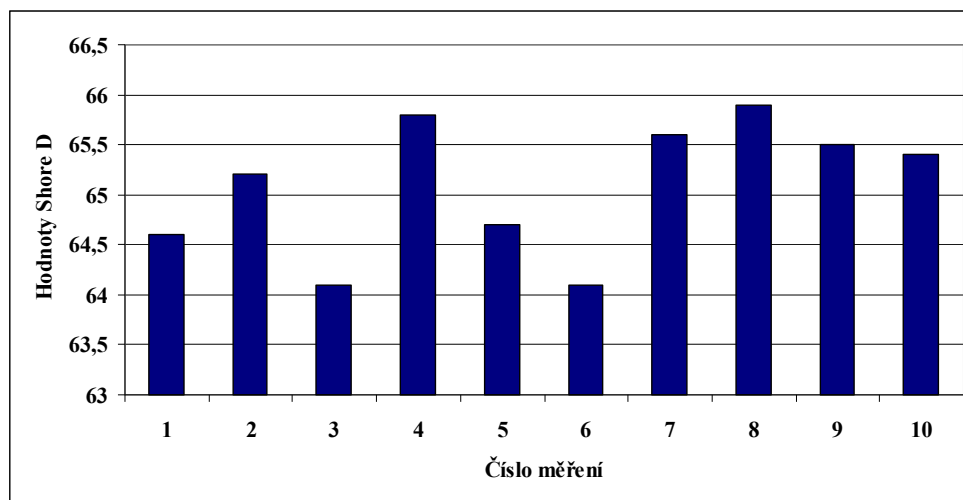
$s = 0,21$ HShD

n – číslo měření

HShD – tvrdost Shore D

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 28. Naměřené hodnoty pro PA 12 zkouškou Shore D

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou Shore D pro PA 12 je $65,1 \pm 0,21$ HShD (tab. 24 a obr. 28).

Měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky (BIM) u polymeru PA 12

Pro měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky byly vybrány metody, kde zkušební těleso (indenter) byla kulička o průměru 5 mm, předběžné zatížení bylo 9,8 N a celkové zatížení v prvním případě bylo 132 N, v druhém případě 358 N a ve třetím případě 961 N. Vzorek

z PA 12 byl změřen desetkrát na jednotlivých místech zkušebního vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

V tabulce 25 a na obrázku 29 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 132 N pro PA 12.

Tab. 25. *Hodnoty pro PA 12 naměřené zkouškou HB 5/132/4*

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	55,55	60,86	57,5	61,47	60,15	60,86	60,15	56,18	57,32	63,22	59,33

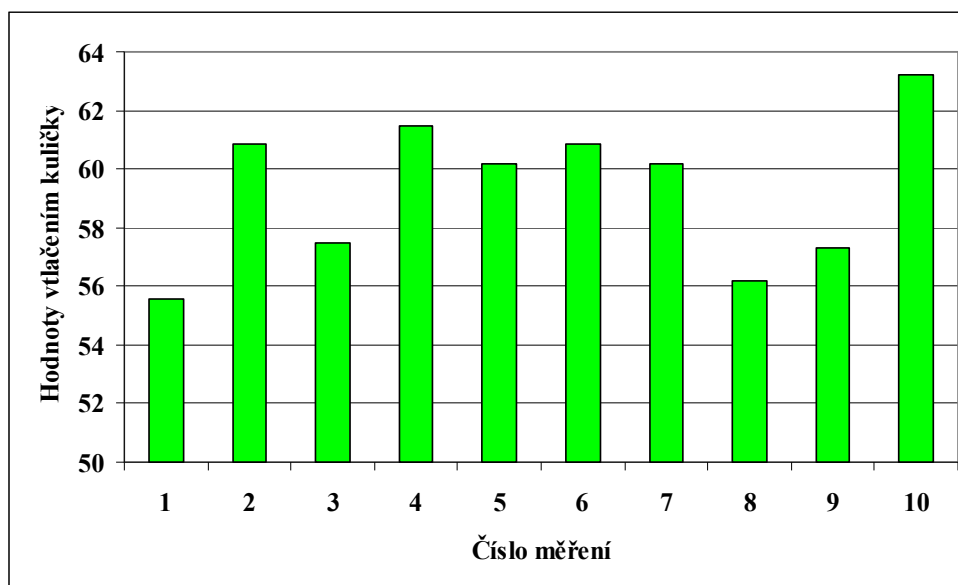
$s = 0,79$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 29. *Naměřené hodnoty pro PA 12 zkouškou HB 5/132/4*

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 132 N pro PA 12 je **59,33 ± 0,79 HB** (tab. 25 a obr. 29).

V tabulce 26 a na obrázku 30 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 358 N pro PA 12.

Tab. 26. *Hodnoty pro PA 12 naměřené zkouškou HB 5/358/4*

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	61,26	59,98	63,41	64,72	67,62	68,72	67,86	67,27	64,98	63,48	64,93

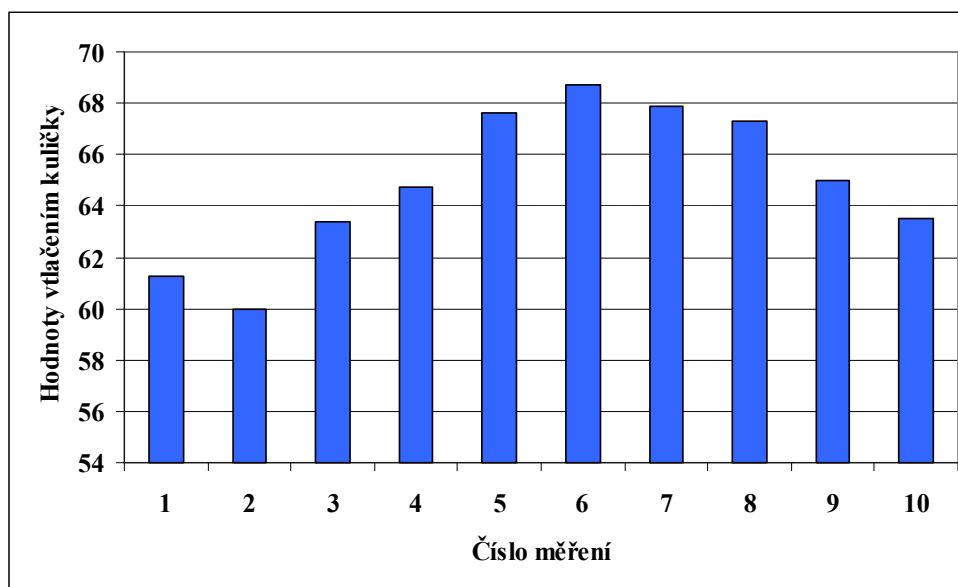
$s = 0,93$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 30. *Naměřené hodnoty pro PA 12 zkouškou HB 5/358/4*

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 358 N pro PA 12 je **$64,93 \pm 0,93$ HB** (tab. 26 a obr. 30).

V tabulce 27 a na obrázku 31 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 961 N pro PA 12.

Tab. 27. Hodnoty pro PA 12 naměřené zkouškou HB 5/961/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	72,16	72,56	70,14	70,86	70,69	70,28	70,36	71,63	69,61	72,08	71,04

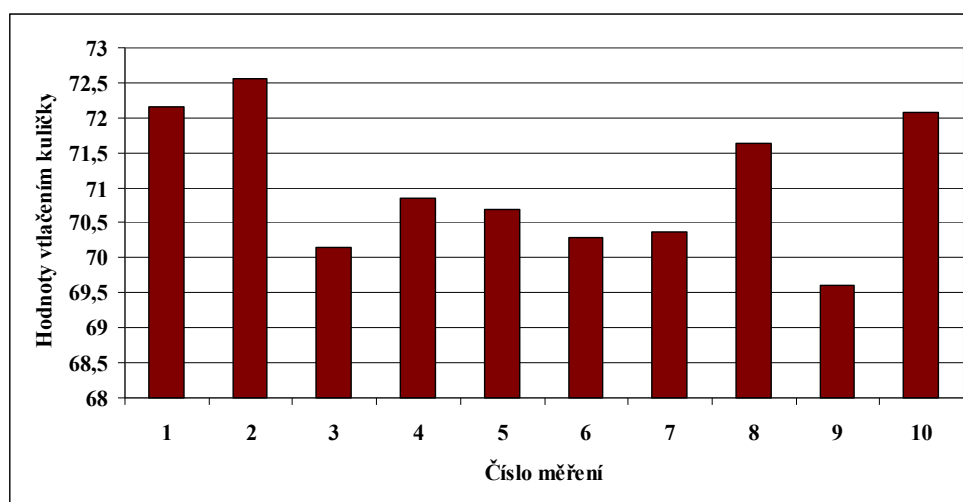
$s = 0,31$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

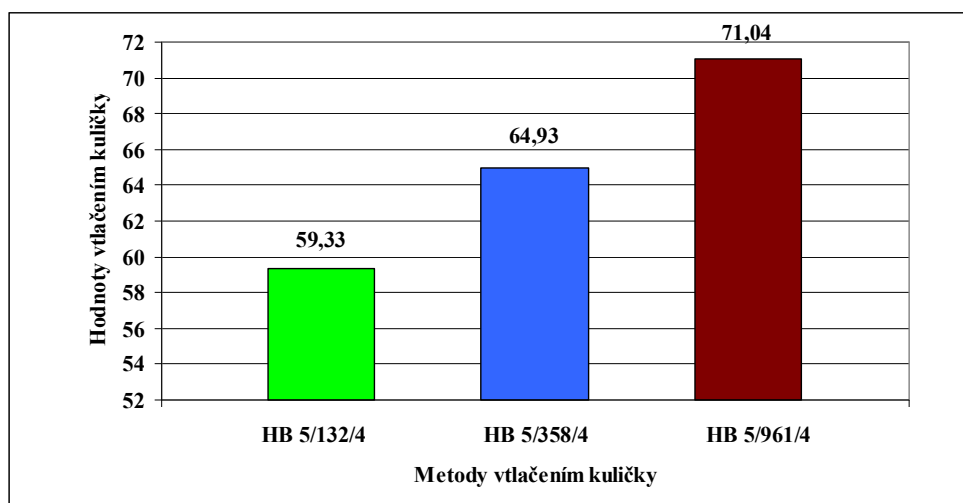
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 31. Naměřené hodnoty pro PA 12 zkouškou HB 5/961/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 961 N pro PA 12 je **71,04 ± 0,31 HB** (tab. 27 a obr. 31).

Na obrázku 32 jsou porovnány výsledné hodnoty pro PA 12 metodou vtláčením kuličky získané aritmetickým průměrem.



Obr. 32. Porovnání tvrdosti PA 12 metodou vtláčením kuličky

2.2.5 Polyamid 66 (PA 66)

Polyamid 66 se vyrábí z kyseliny adipové a hexametylendiamin. Tento polymer je málo navlhavý, středně houževnatý, tvrdý. Vyznačuje se vysokou pevností a vyšší teplotou tání. Rozsah teplot použití od -30°C do 120°C . Používá se hlavně na vlákna a fólie, ale i jako obecný plast. Dobře se zpracovává všemi běžnými způsoby (vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním). [13]

Měření tvrdosti podle Shore D u polymeru PA 66

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byla vybrána metoda s označením D, vnikací těleso (indenter) s kuželovým hrotem. Zkušební těleso z PA 66 bylo změřeno desetkrát na jednotlivých místech zkušebního vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Tab. 28. Hodnoty pro PA 66 naměřené zkouškou podle Shore D

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HShD	71,5	72,2	72,4	71	69,7	65,7	67,7	71,1	70,4	71,1	70,3

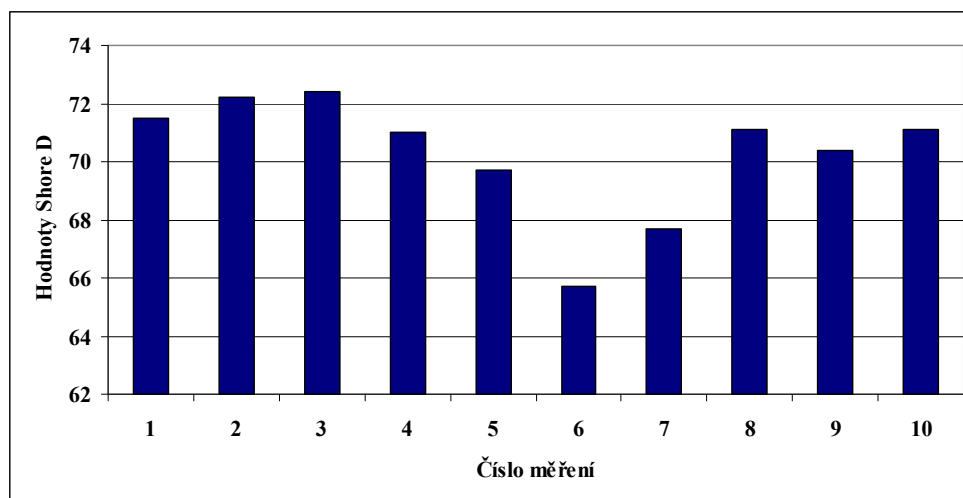
$s = 0,66 \text{ HShD}$

n – číslo měření

HShD – tvrdost Shore D

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 33. Naměřené hodnoty pro PA 66 zkouškou Shore D

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou Shore D pro PA 66 je $70,3 \pm 0,66$ HShD (tab. 28 a obr. 33).

Měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky (BIM) u polymeru PA 66

Pro měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky byly vybrány metody, kde zkušební těleso (indentor) byla kulička o průměru 5 mm, předběžné zatížení bylo 9,8 N a celkové zatížení v prvním případě bylo 132 N, v druhém případě 358 N a ve třetím případě 961 N. Vzorek z PA 66 byl změřen desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

V tabulce 29 a na obrázku 34 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 132 N pro PA 66.

Tab. 29. Hodnoty pro PA 66 naměřené zkouškou HB 5/132/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	163,59	142,6	160,06	177	153,45	165,43	179,75	186,74	171,87	166,52	166,7

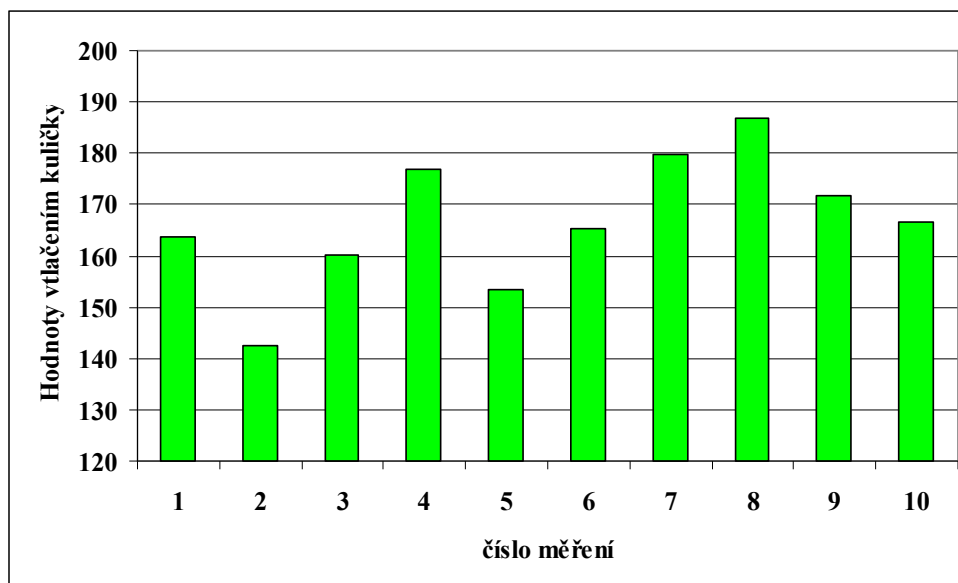
s = 4,10 HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 34. Naměřené hodnoty pro PA 66 zkouškou HB 5/132/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 132 N pro PA 66 je **166,7 ± 4,10 HB** (tab. 29 a obr. 34).

V tabulce 30 a na obrázku 35 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 358 N pro PA 66.

Tab. 30. Hodnoty pro PA 66 naměřené zkouškou HB 5/358/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	129,44	136,62	129,65	137,36	127,32	136,2	131,85	131,17	131,3	134,93	132,58

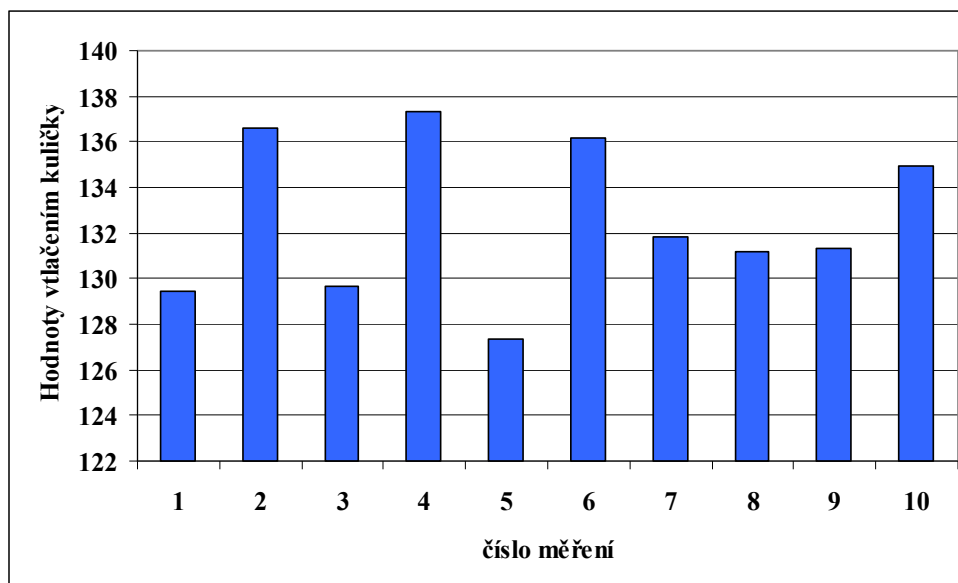
$s = 1,09$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 35. Naměřené hodnoty pro PA 66 zkouškou HB 5/358/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 358 N pro PA 66 je **132,58 ± 1,09 HB** (tab. 30 a obr. 35).

V tabulce 31 a na obrázku 36 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 961 N pro PA 66.

Tab. 31. Hodnoty pro PA 66 naměřené zkouškou HB 5/961/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	147,43	151,05	156,49	152,48	154,82	152,57	153,16	154,71	153,9	158,18	153,48

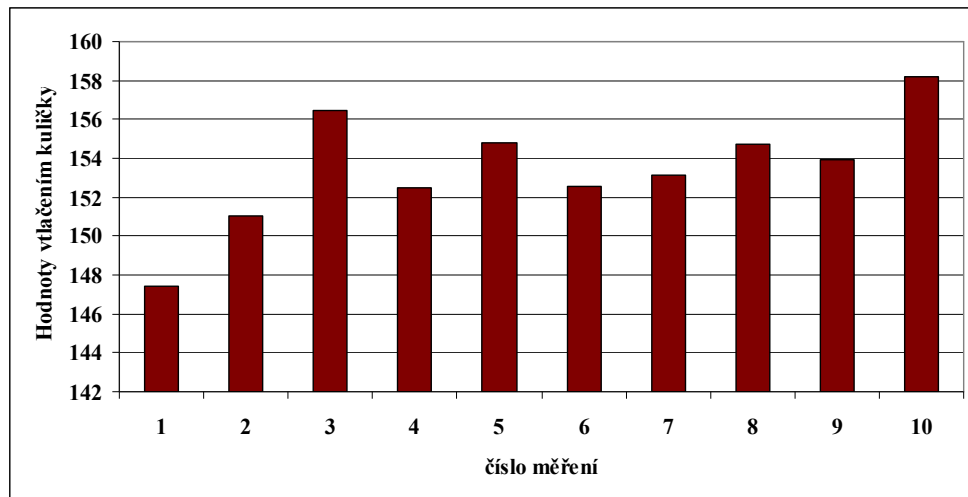
$s = 0,93$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

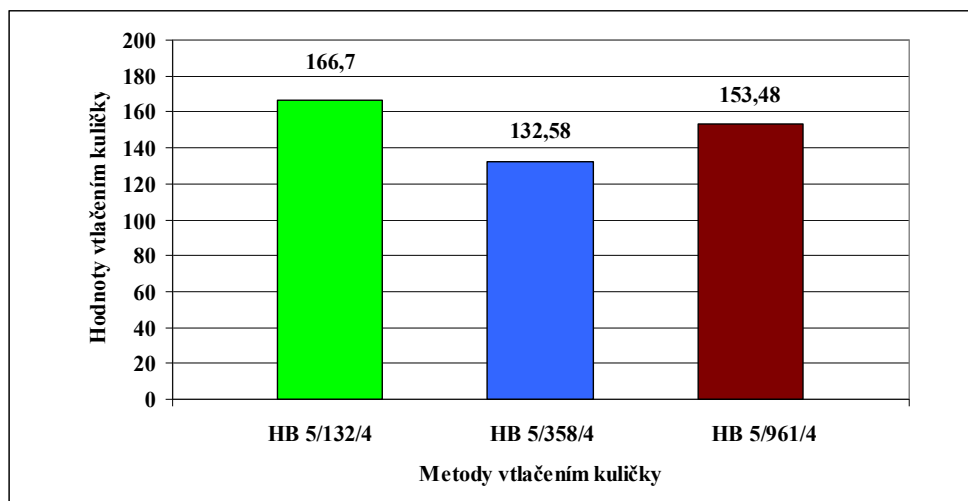
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 36. Naměřené hodnoty pro PA 66 zkouškou HB 5/961/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 961 N pro PA 66 je **153,48 ± 0,93 HB** (tab. 31 a obr. 36).

Na obrázku 37 jsou porovnány výsledné hodnoty pro PA 66 metodou vtláčením kuličky získané aritmetickým průměrem.



Obr. 37. Porovnání tvrdosti PA 66 metodou vtláčením kuličky

2.3 Polyestery

Polyestery představují velkou skupinu polymerů, jejichž charakteristickým znakem je přítomnost esterových vazeb v hlavních řetězcích. Lze je rozdělit na typy lineární a termoplastické a na typy rozvětvené a reaktoplastické.

2.3.1 Polybutyltereftalát (PBT)

Polybutyltereftalát se vyrábí z kyseliny tereftalové a butylenglykolu polykondenzační polymerací. Výsledná struktura je lineární, krystalická. Tento polymer je vhodný na dloužení, má dobrou zpracovatelnost, odolnost vůči oděru a malou absorpci vody. Rozsah teplot použití je od -30°C až do 165°C . Zpracovává se zejména vstřikováním. Používá se v automobilovém průmyslu a v elektrotechnice. [13]

Měření tvrdosti podle Shore D u polymeru PBT

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byla vybrána metoda s označením D, vnikací těleso (indenter) s kuželovým hrotem. Zkušební těleso z PBT bylo změřeno desetkrát na jednotlivých místech zkušebního vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Tab. 32. Hodnoty pro PBT naměřené zkouškou podle Shore D

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HShD	62	62	61,4	61,2	62,3	62,8	62,8	62,9	61,1	61,6	62

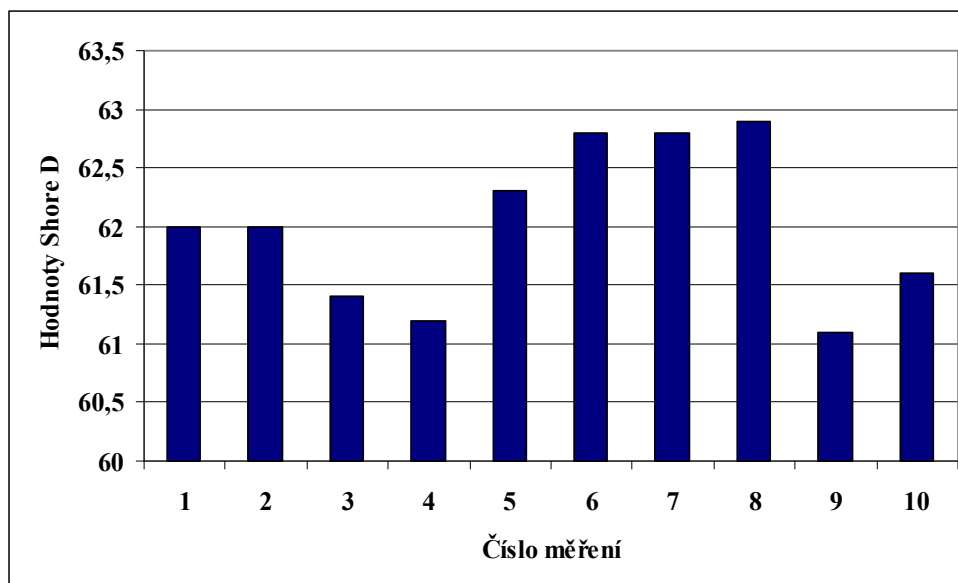
$$s = 0,21 \text{ HShD}$$

n – číslo měření

HShD – tvrdost Shore D

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 38. Naměřené hodnoty pro PBT zkouškou Shore D

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou Shore D pro PBT je $62 \pm 0,21$ HShD (tab. 32 a obr 38).

Měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky (BIM) u polymeru PBT

Pro měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky byly vybrány metody, kde zkušební těleso (indentor) byla kulička o průměru 5 mm, předběžné zatížení bylo 9,8 N a celkové zatížení v prvním případě bylo 132 N, v druhém případě 358 N a ve třetím případě 961 N. Vzorek z PBT byl změřen desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

V tabulce 33 a na obrázku 39 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 132 N pro PBT.

Tab. 33. Hodnoty pro PBT naměřené zkouškou HB 5/132/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	61,74	61,36	59,33	60,17	60,41	61,92	61,39	60,22	58,54	56,95	60,2

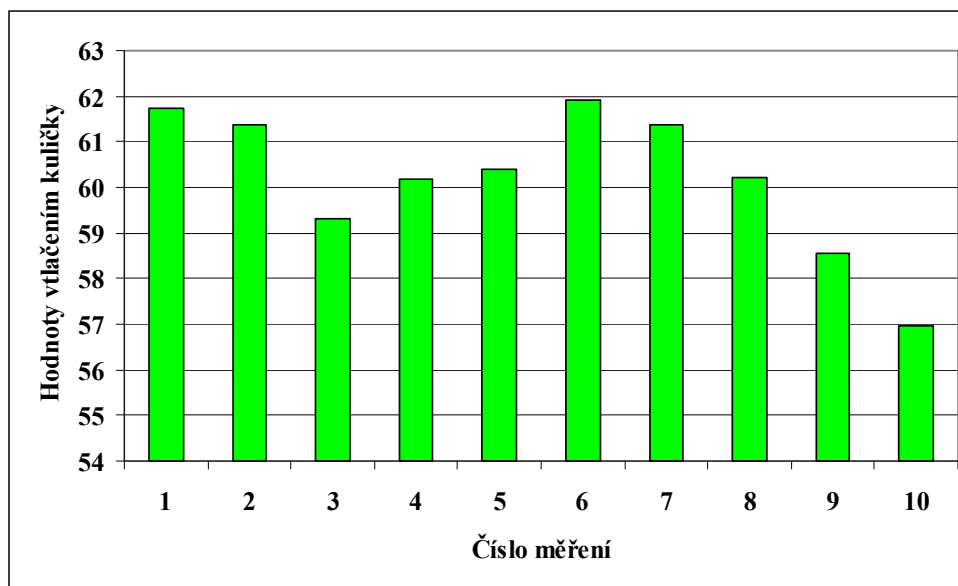
$s = 0,49$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 39. Naměřené hodnoty pro PBT zkouškou HB 5/132/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 132 N pro PBT je **60,2 ± 0,49 HB** (tab. 33 a obr. 39).

V tabulce 34 a na obrázku 40 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 358 N pro PBT.

Tab. 34. Hodnoty pro PBT naměřené zkouškou HB 5/358/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	61,82	59,33	58,49	58,7	59,62	58,75	59,55	59,99	60,58	50,84	58,77

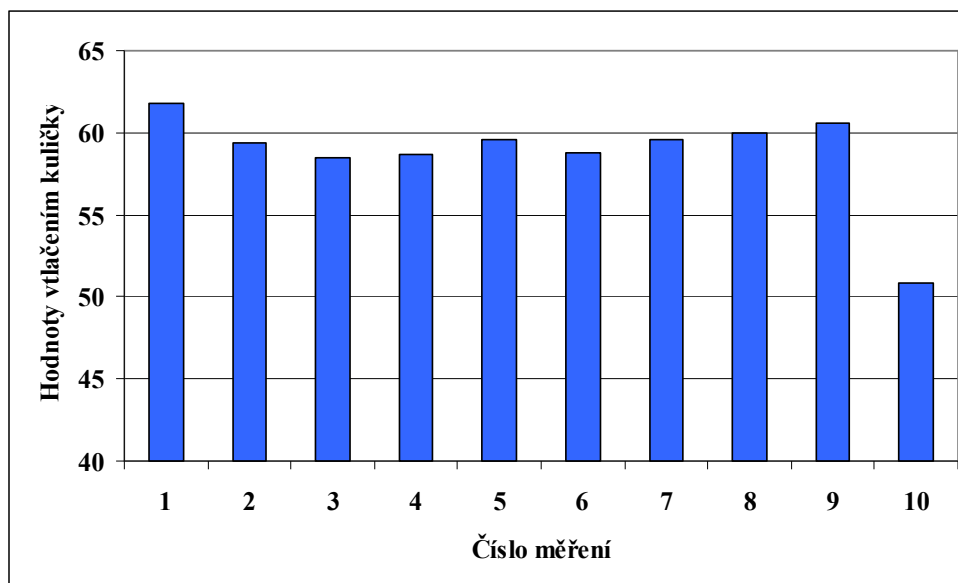
s = 0,93 HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 40. Naměřené hodnoty pro PBT zkouškou HB 5/358/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 358 N pro PBT je $58,77 \pm 0,93$ HB (tab. 34 a obr. 40).

V tabulce 35 a na obrázku 41 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 961 N pro PBT.

Tab. 35. Hodnoty pro PBT naměřené zkouškou HB 5/961/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	55,69	57,84	56,23	55,78	57,94	57,23	59,05	58,23	59,69	59,37	57,71

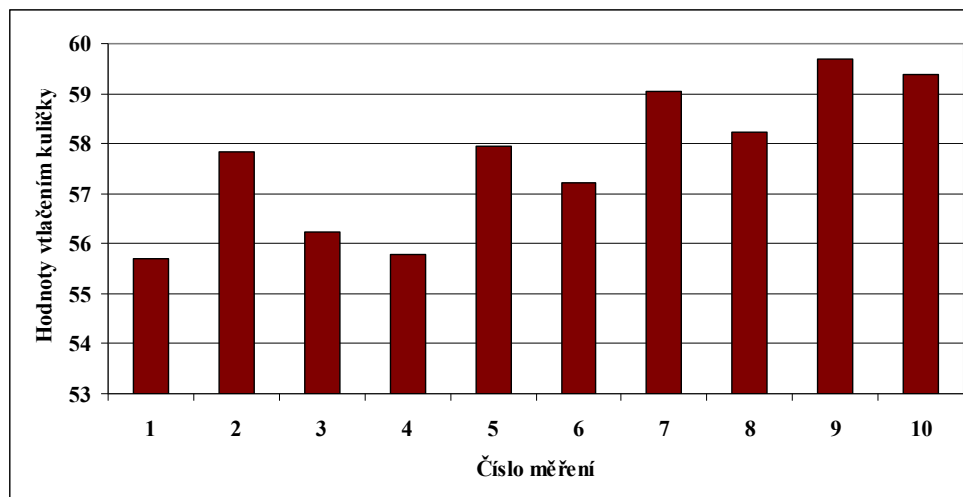
$s = 0,46$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

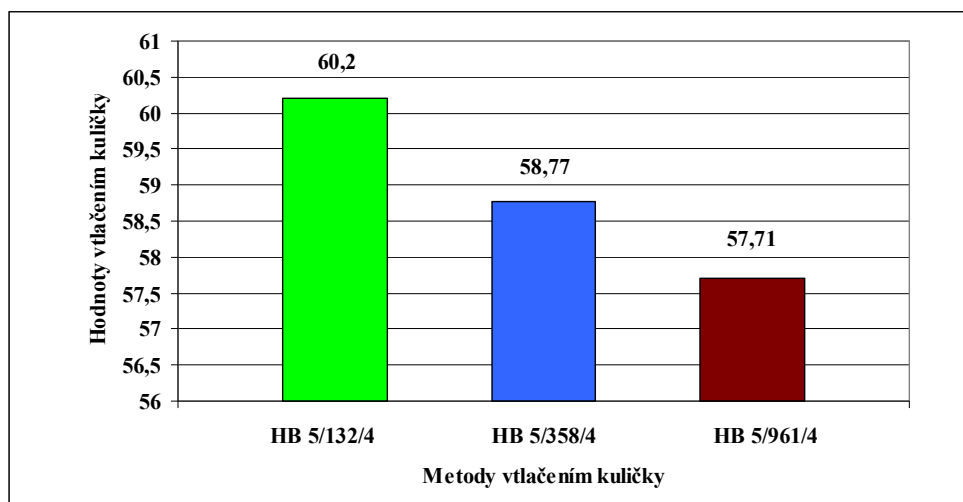
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 41. Naměřené hodnoty pro PBT zkouškou HB 5/961/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 961 N pro PBT je $57,71 \pm 0,46$ HB (tab. 35 a obr. 41).

Na obrázku 42 jsou porovnány výsledné hodnoty pro PBT metodou vtláčením kuličky získané aritmetickým průměrem.



Obr. 42. Porovnání tvrdosti PBT metodou vtláčením kuličky

2.3.2 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát se vyrábí z monomeru dian a fosgen polykondenzační polymerací za vzniku NaCl. Výsledná struktura je zcela amorfní, zcela průhledný polymer. Polykarbonát se vyznačuje vysokou pevností, vysokou rozměrovou stálostí, nízkou nasákavostí a vysokou tvrdostí. Rozsah teplot použití je od -70°C do 130°C . Zpracovává se vstřikováním a vytla-

čováním. Používá se v automobilovém průmyslu, kde se z něj vyrábí především světlometry. Dále se z něj vyrábějí technické dílce pro mechanické namáhání i za zvýšených teplot. [13]

Měření tvrdosti podle Shore D u polymeru PC

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byla vybrána metoda s označením D, vnikací těleso (indenter) s kuželovým hrotem. Zkušební těleso z PC bylo změřeno desetkrát na jednotlivých místech zkušebního vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Tab. 36. Hodnoty pro PC naměřené zkouškou podle Shore D

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HShD	76,5	77,5	74,7	75,3	77,2	74,8	78,2	75,1	74,8	75,4	75,9

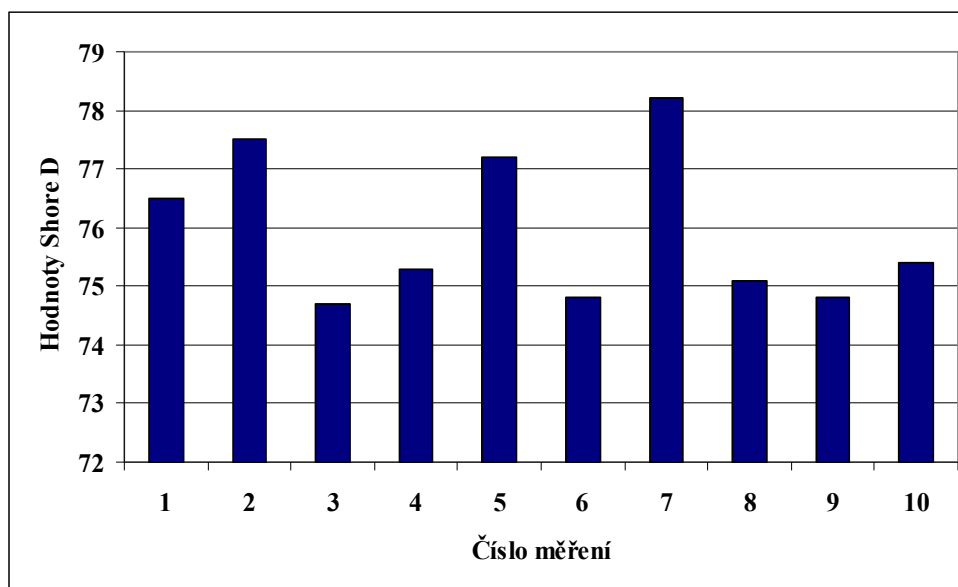
$s = 0,40$ HShD

n – číslo měření

HShD – tvrdost Shore D

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 43. Naměřené hodnoty pro PC zkouškou Shore D

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou Shore D pro PC je $75,9 \pm 0,40$ HShD (tab. 36 a obr. 43).

Měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky (BIM) u polymeru PC

Pro měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky byly vybrány metody, kde zkušební těleso (indentor) byla kulička o průměru 5 mm, předběžné zatížení bylo 9,8 N a celkové zatížení v prvním případě bylo 132 N, v druhém případě 358 N a ve třetím případě 961 N. Vzorek z PC byl změřen desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

V tabulce 37 a na obrázku 44 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 132 N pro PC.

Tab. 37. Hodnoty pro PC naměřené zkouškou HB 5/132/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	184,26	187,69	212,94	183,54	183,3	189,6	198,23	197,17	165,43	196,35	189,85

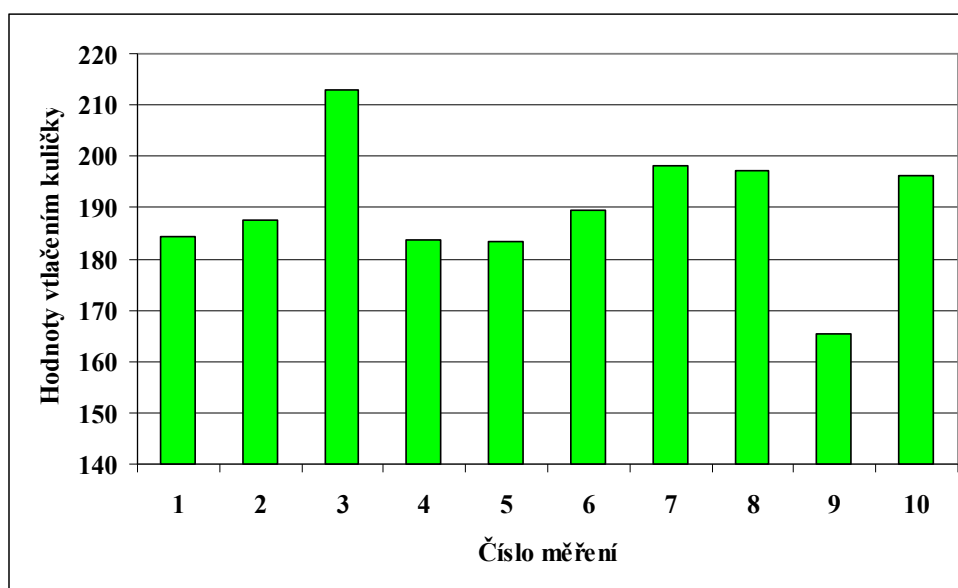
$s = 3,96$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 44. Naměřené hodnoty pro PC zkouškou HB 5/132/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 132 N pro PC je **189,85 ± 3,96 HB** (tab. 37 a obr. 44).

V tabulce 38 a na obrázku 45 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 358 N pro PC.

Tab. 38. Hodnoty pro PC naměřené zkouškou HB 5/358/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	144,49	127,09	137,18	134,67	135,89	134,93	134,22	132,51	143,92	138,92	136,38

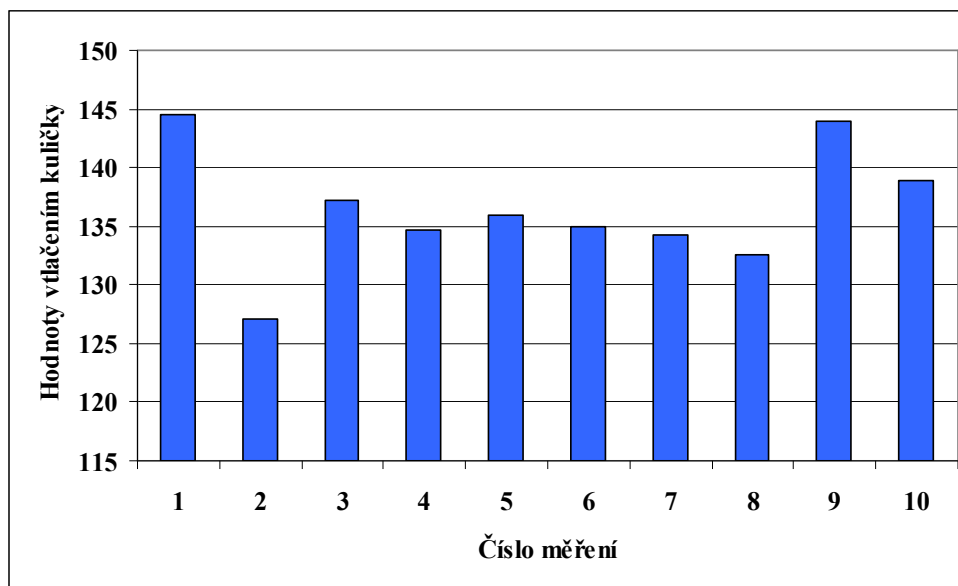
$s = 1,63$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 45. Naměřené hodnoty pro PC zkouškou HB 5/358/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 358 N pro PC je **136,38 ± 1,63 HB** (tab. 38 a obr. 45).

V tabulce 39 a na obrázku 46 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 961 N pro PC.

Tab. 39. Hodnoty pro PC naměřené zkouškou HB 5/961/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	130,4	135,07	135,95	135,24	134,14	137,54	135,28	136,95	136,67	132,5	134,97

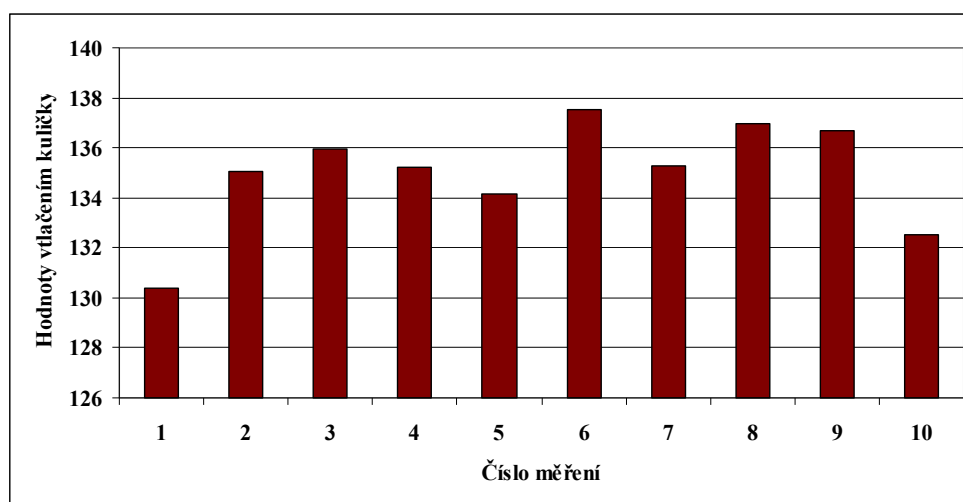
$s = 0,68$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

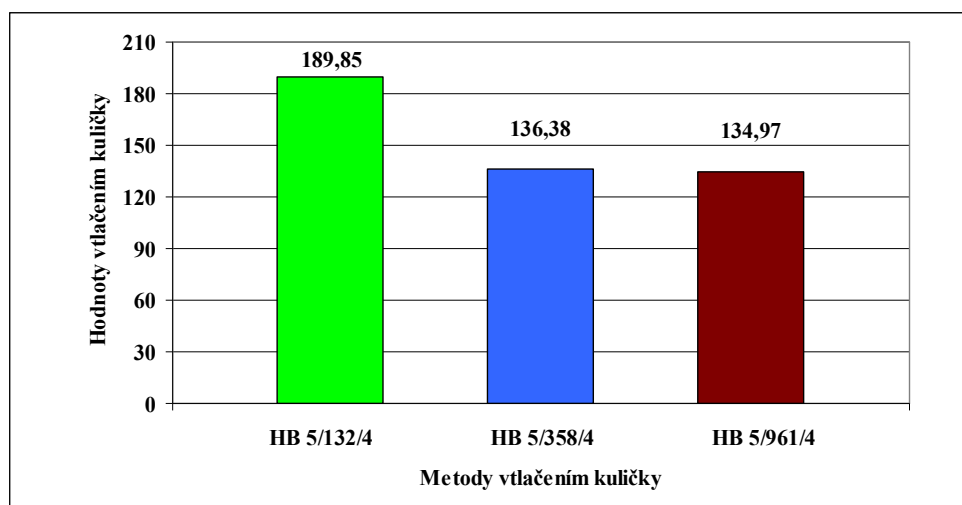
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 46. Naměřené hodnoty pro PC zkouškou HB 5/961/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 961 N pro PC je **134,97 ± 0,68 HB** (tab. 39 a obr. 46).

Na obrázku 47 jsou porovnány výsledné hodnoty pro PC metodou vtláčením kuličky získané aritmetickým průměrem.



Obr. 47. Porovnání tvrdosti PC metodou vtláčením kuličky

2.3.3 Polykarbonát s 20% skelných vláken (PC GF20)

Polykarbonát s 20% skelných vláken se vyrábí z monomeru dian a fosgen polykondenzační polymerací za vzniku NaCl a do výsledného produktu se přidá 20% skelných vláken. Tento polymer se vyznačuje vysokou pevností, vysokou rozměrovou stálostí, nízkou nasákavostí a vysokou tvrdostí. Zpracovává se vstřikováním a vytlačováním. Používá se v automobilovém průmyslu a elektrotechnice. [13]

Měření tvrdosti podle Shore D u polymeru PC GF20

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byla vybrána metoda s označením D, vnikací těleso (indenter) s kuželovým hrotem. Zkušební těleso z PC GF20 bylo změřeno desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Tab. 40. Hodnoty pro PC GF20 naměřené zkouškou podle Shore D

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HShD	77,7	76,3	74,6	75	77,3	75,6	74,8	75,5	74,7	76,5	75,8

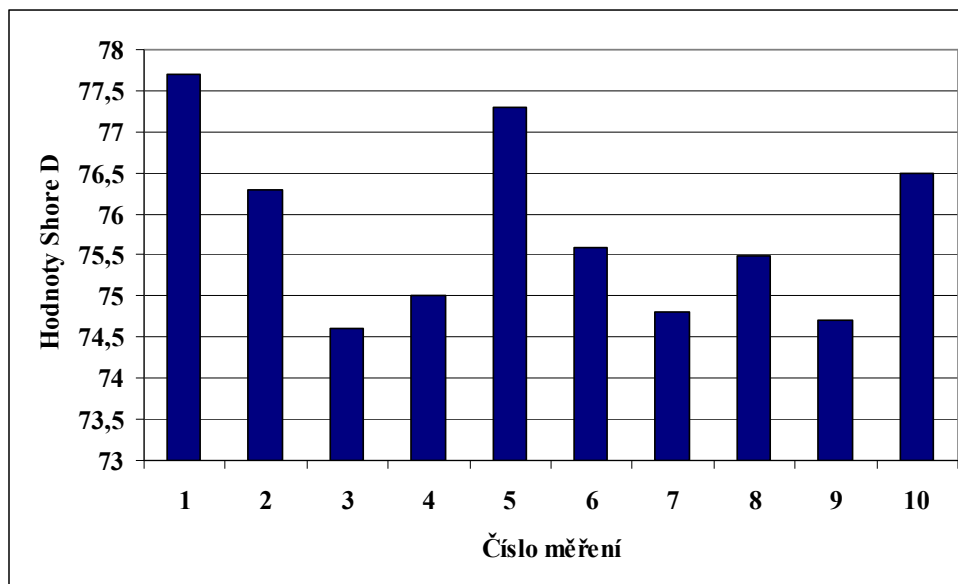
$$s = 0,35 \text{ HShD}$$

n – číslo měření

HShD – tvrdost Shore D

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 48. Naměřené hodnoty pro PC GF20 zkouškou Shore D

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou Shore D pro PC GF20 je $75,8 \pm 0,35$ HShD (tab. 40 a obr. 48).

Měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky (BIM) u polymeru PC GF20

Pro měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky byly vybrány metody, kde zkušební těleso (indenter) byla kulička o průměru 5 mm, předběžné zatížení bylo 9,8 N a celkové zatížení v prvním případě bylo 132 N, v druhém případě 358 N a ve třetím případě 961 N. Vzorek z PC GF20 byl změřen desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

V tabulce 41 a na obrázku 49 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 132 N pro PC GF20.

Tab. 41. Hodnoty pro PC GF20 naměřené zkouškou HB 5/132/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	166,33	196,63	218,27	183,11	189,86	211,72	176,56	185,13	179,11	195,05	190,18

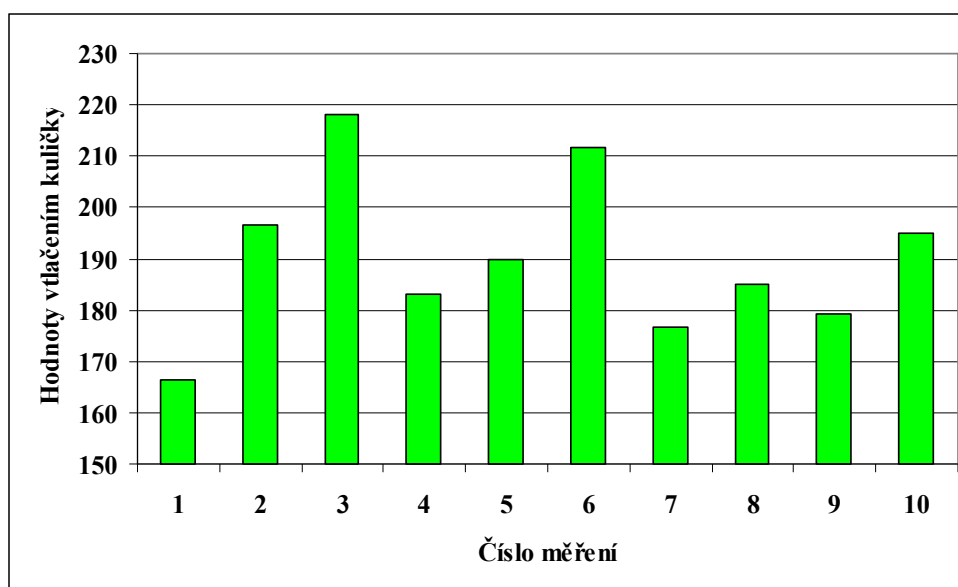
s = 5,02 HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 49. Naměřené hodnoty pro PC GF20 zkouškou HB 5/132/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 132 N pro PC GF20 je **190,18 ± 5,02 HB** (tab. 41 a obr. 49).

V tabulce 42 a na obrázku 50 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 358 N pro PC GF20.

Tab. 42. Hodnoty pro PC GF20 naměřené zkouškou HB 5/358/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	129,78	132,54	128,33	133,5	130,91	135,61	138,87	133,6	143,87	136,77	134,38

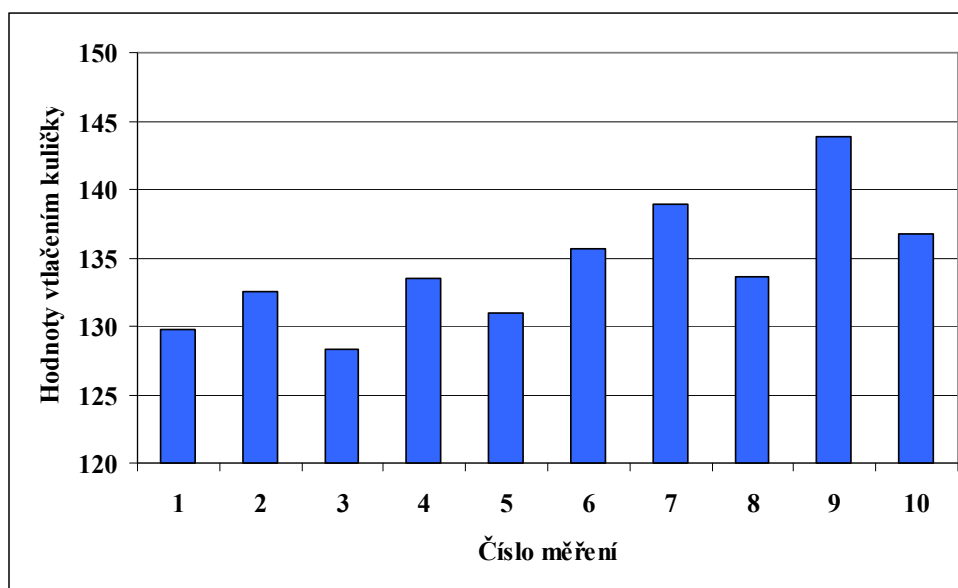
$s = 1,46$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 50. Naměřené hodnoty pro PC GF20 zkouškou HB 5/358/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 358 N pro PC GF20 je **134,38 ± 1,46 HB** (tab. 42 a obr. 50).

V tabulce 43 a na obrázku 51 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 961 N pro PC GF20.

Tab. 43. Hodnoty pro PC GF20 naměřené zkouškou HB 5/961/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	130,19	131,45	130,92	135,19	134,77	134,27	135,06	139,74	137,47	138,81	134,79

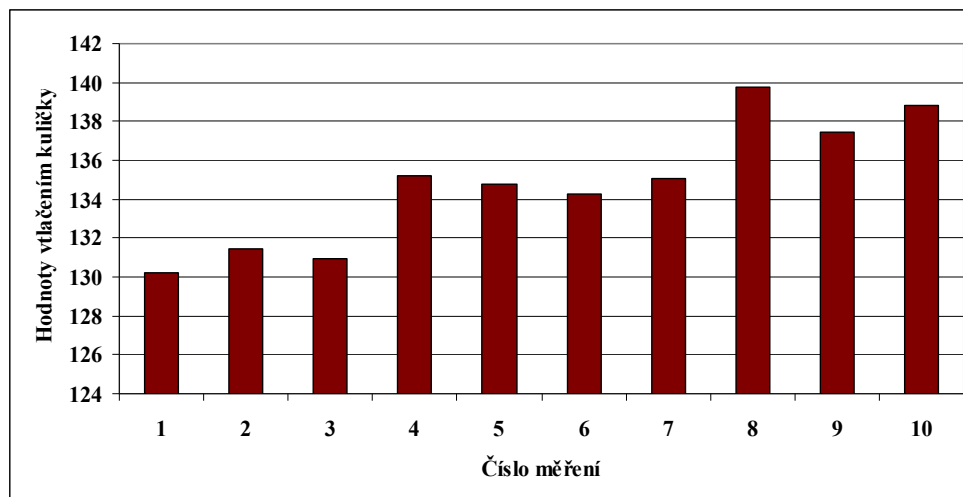
s = 1,03 HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

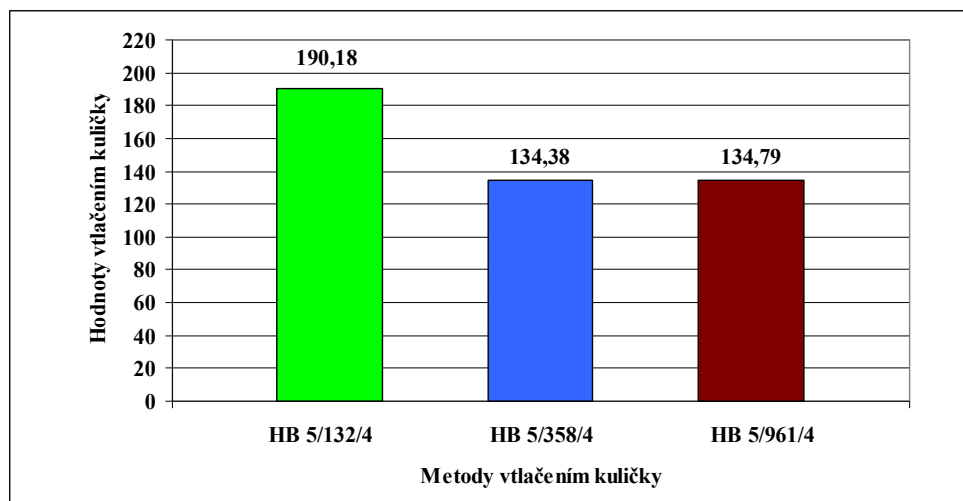
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 51. Naměřené hodnoty pro PC GF20 zkouškou HB 5/961/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 961 N pro PC GF20 je $134,79 \pm 1,03$ HB (tab. 43 a obr. 51).

Na obrázku 52 jsou porovnány výsledné hodnoty pro PC GF20 metodou vtláčením kuličky získané aritmetickým průměrem.



Obr. 52. Porovnání tvrdosti PC GF20 metodou vtláčením kuličky

2.3.4 Polykarbonát s 30% skelných vláken (PC GF30)

Polykarbonát s 30% skelných vláken se vyrábí z monomeru dian a fosgen polykondenzační polymerací za vzniku NaCl a do výsledného produktu se přidá 30% skelných vláken. Tento polymer se vyznačuje vysokou pevností, vysokou rozměrovou stálostí, nízkou nasákavostí a

vysokou tvrdostí. Zpracovává se vstřikováním a vylačováním. Používá se v automobilovém průmyslu a elektrotechnice. [13]

Měření tvrdosti podle Shore D u polymeru PC GF30

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byla vybrána metoda s označením D, vnikací těleso (indenter) s kuželovým hrotem. Zkušební těleso z PC GF30 bylo změřeno desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Tab. 44. Hodnoty pro PC GF30 naměřené zkouškou podle Shore D

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HShD	77	77,1	75,4	74,5	75,1	77	78,1	74,9	74,6	75,1	75,9

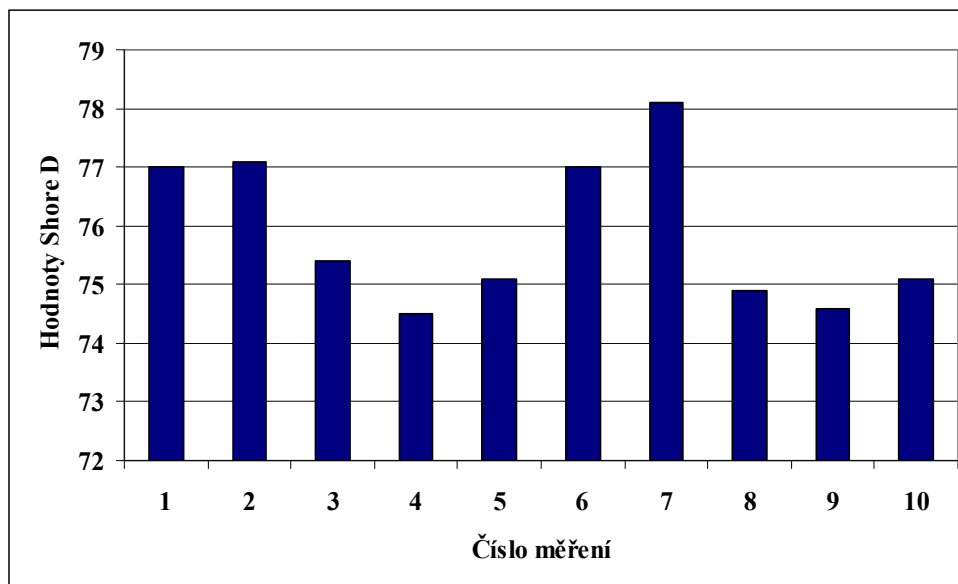
$s = 0,40$ HShD

n – číslo měření

HShD – tvrdost Shore D

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 53. Naměřené hodnoty pro PC GF30 zkouškou Shore D

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou Shore D pro PC GF30 je $75,9 \pm 0,40$ HShD (tab. 44 a obr. 53).

Měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky (BIM) u polymeru PC GF30

Pro měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky byly vybrány metody, kde zkušební těleso (indentor) byla kulička o průměru 5 mm, předběžné zatížení bylo 9,8 N a celkové zatížení v prvním případě bylo 132 N, v druhém případě 358 N a ve třetím případě 961 N. Vzorek z PC GF30 byl změřen desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

V tabulce 45 a na obrázku 54 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 132 N pro PC GF30.

Tab. 45. Hodnoty pro PC GF30 naměřené zkouškou HB 5/132/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	170,92	198,51	194,83	197,95	185,86	178,66	172,46	189,86	168,59	201,68	185,93

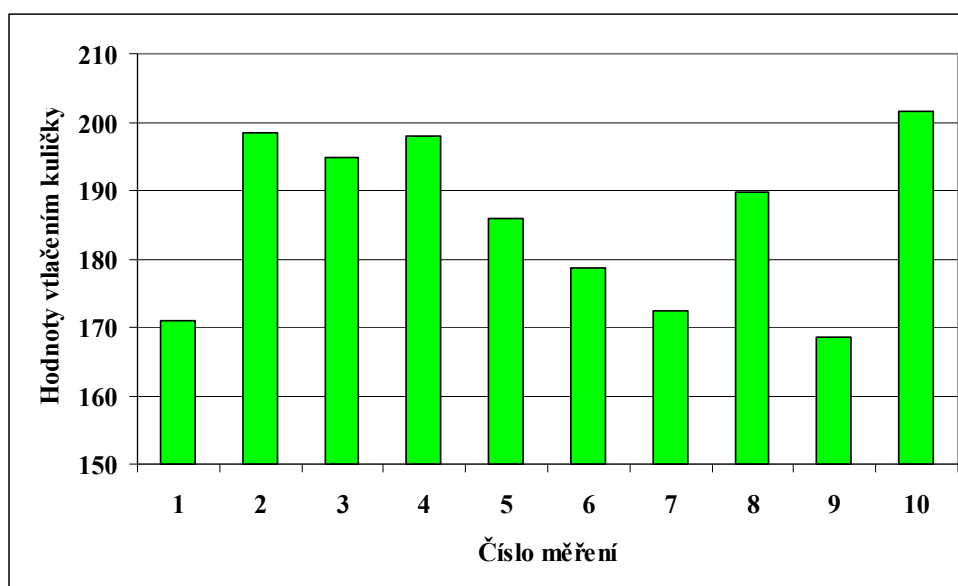
$s = 3,95$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 54. Naměřené hodnoty pro PC GF30 zkouškou HB 5/132/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 132 N pro PC GF30 je **185,93 ± 3,95 HB** (tab. 45 a obr. 54).

V tabulce 46 a na obrázku 55 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 358 N pro PC GF30.

Tab. 46. Hodnoty pro PC GF30 naměřené zkouškou HB 5/358/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	138,07	134,97	136,25	133,16	131,38	137,23	134,18	136,85	131,85	138,11	135,19

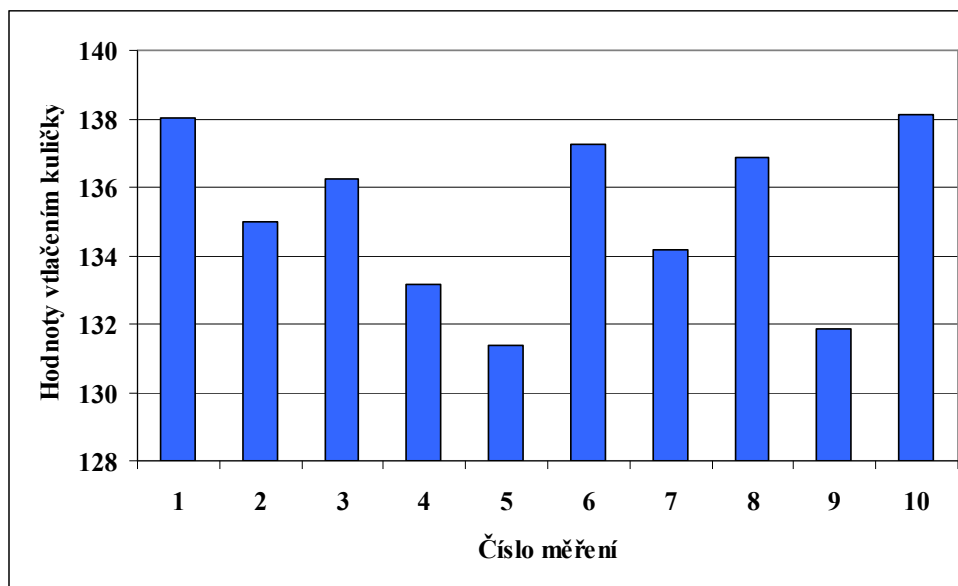
$s = 0,78$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 55. Naměřené hodnoty pro PC GF30 zkouškou HB 5/358/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 358 N pro PC GF30 je **135,19 ± 0,78 HB** (tab. 46 a obr. 55).

V tabulce 47 a na obrázku 56 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 961 N pro PC GF30.

Tab. 47. Hodnoty pro PC GF30 naměřené zkouškou HB 5/961/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	128,42	134,26	133,91	136,47	135,2	136,31	135,53	134,72	138,15	130,6	134,36

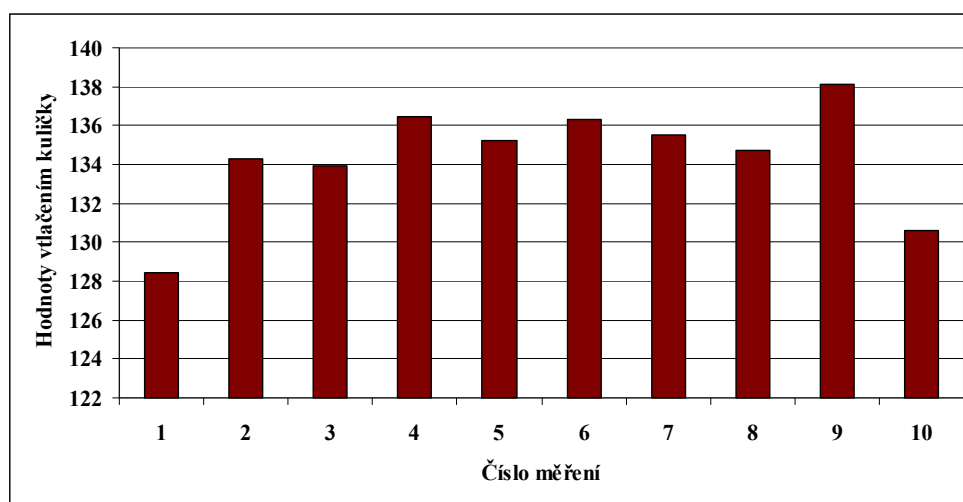
$s = 0,91$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

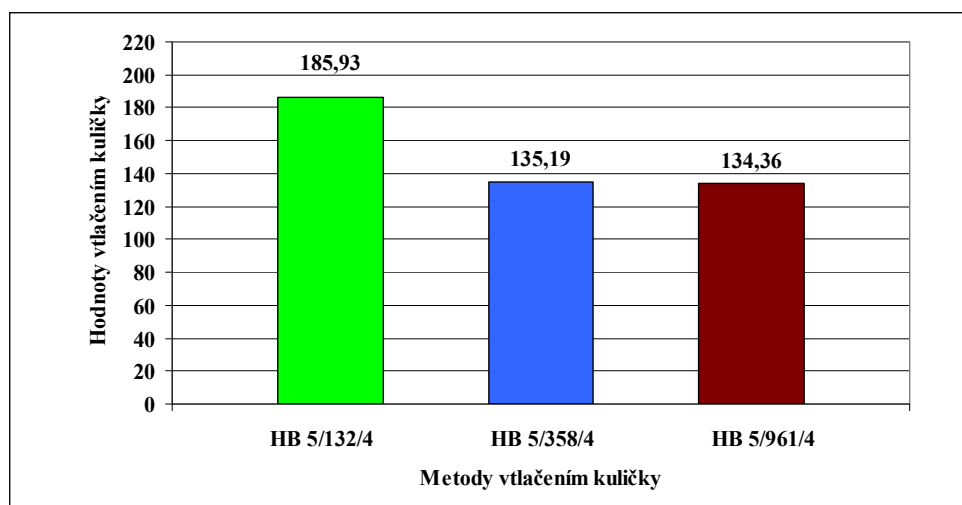
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 56. Naměřené hodnoty pro PC GF30 zkouškou HB 5/961/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 961 N pro PC GF30 je **134,36 ± 0,91 HB** (tab. 47 a obr. 56).

Na obrázku 57 jsou porovnány výsledné hodnoty pro PC GF30 metodou vtláčením kuličky získané aritmetickým průměrem.



Obr. 57. Porovnání tvrdosti PC GF30 metodou vtláčením kuličky

2.3.5 Polykarbonát regranulát (PC regranulát)

Polykarbonát regranulát se vyrábí z čistého nekontaminovaného odpadu jediného plastu polykarbonátu. Čistý polykarbonát se rozdrtí a následně se provede regranulace. Tento produkt se vyznačuje jinými fyzikálními vlastnostmi než původní polykarbonát. Používá se u nevzhledných výrobků. [13]

Měření tvrdosti podle Shore D u polymeru PC regranulát

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byla vybrána metoda s označením D, vnikací těleso (indenter) s kuželovým hrotem. Zkušební těleso z PC regranulátu bylo změřeno desetkrát na jednotlivých místech zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Tab. 48. Hodnoty pro PC regranulát naměřené zkouškou podle Shore D

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HShD	76,1	75,1	75	78,5	78	74,8	74,6	75,3	76,3	77,3	76,1

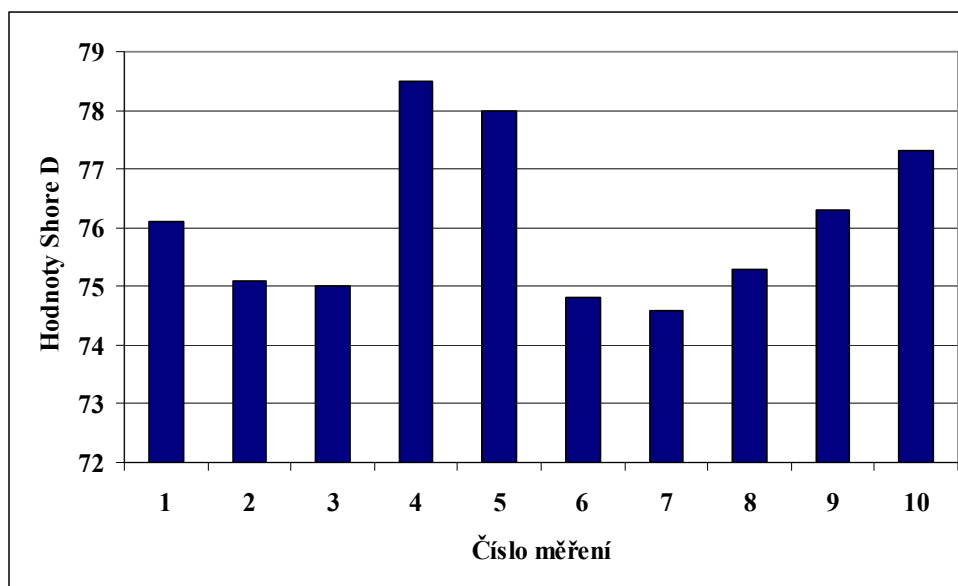
$$s = 0,44 \text{ HShD}$$

n – číslo měření

HShD – tvrdost Shore D

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 58. Naměřené hodnoty pro PC regranulát zkouškou Shore D

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou Shore D pro PC regranulát je **76,1 ± 0,44 HShD** (tab. 48 a obr. 58).

Měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky (BIM) u polymeru PC regranulát

Pro měření tvrdosti metodou vtlačení kuličky byly vybrány metody, kde zkušební těleso (indenter) byla kulička o průměru 5 mm, předběžné zatížení bylo 9,8 N a celkové zatížení v prvním případě bylo 132 N, v druhém případě 358 N a ve třetím případě 961 N. Vzorek z PC regranulátu byl změřen desetkrát na jednotlivých místech zkušebního vzorku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a graficky zpracovány.

V tabulce 49 a na obrázku 59 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 132 N pro PC regranulát.

Tab. 49. Hodnoty pro PC regranulát naměřené zkouškou HB 5/132/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	150,83	165,58	206,16	193,55	174,12	224,16	172,88	189,35	168,43	213,84	185,89

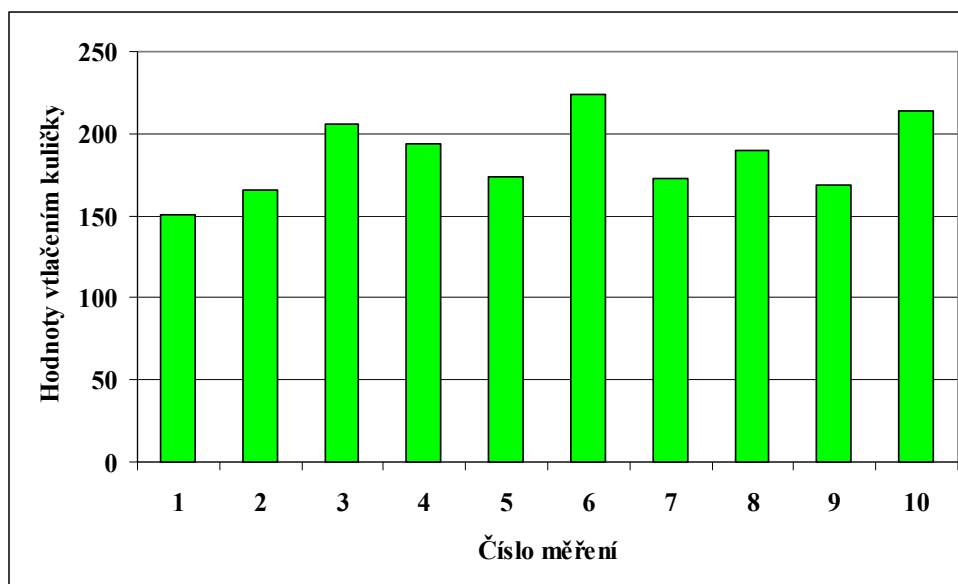
s = 7,43 HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 59. Naměřené hodnoty pro PC regranolát zkouškou HB 5/132/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtlačení kuličky o celkovém zatížení 132 N pro PC regranolát je **185,89 ± 7,43 HB** (tab. 49 a obr. 59).

V tabulce 50 a na obrázku 60 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 358 N pro PC regranolát.

Tab. 50. Hodnoty pro PC regranolát naměřené zkouškou HB 5/358/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	147,55	140,08	138,4	134,31	129,02	136,62	139,64	148,64	143,87	139,35	139,75

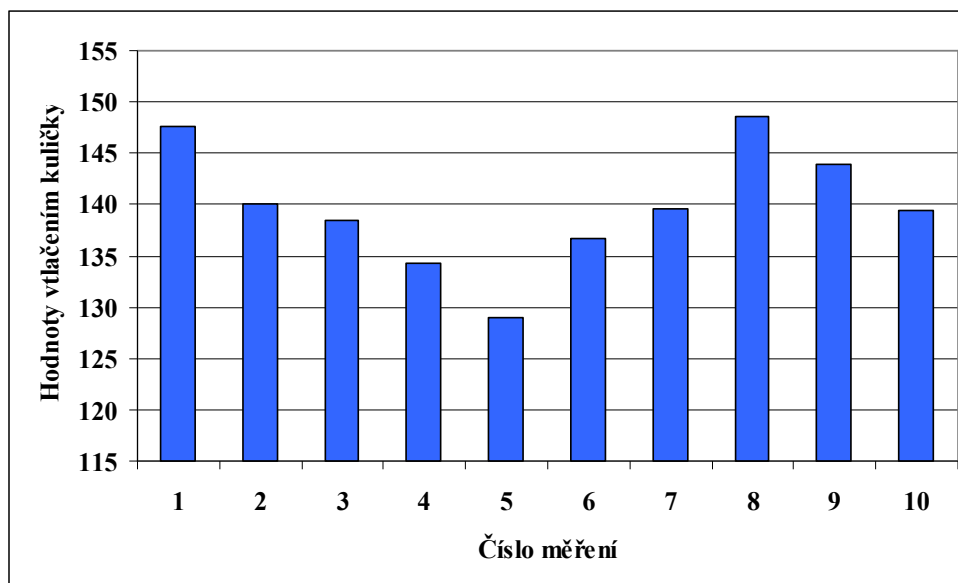
s = 1,86 HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtlačení kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 60. Naměřené hodnoty pro PC regranulát zkouškou HB 5/358/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 358 N pro PC regranulát je $139,75 \pm 1,86$ HB (tab. 50 a obr. 60).

V tabulce 51 a na obrázku 61 jsou zpracovány naměřené hodnoty tvrdosti při zkoušce BIM o celkovém zatížení 961 N pro PC regranulát.

Tab. 51. Hodnoty pro PC regranulát naměřené zkouškou HB 5/961/4

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{x}
HB	132,13	135,56	136,21	137,74	135,82	134,57	137,85	136,26	137,47	139,29	136,29

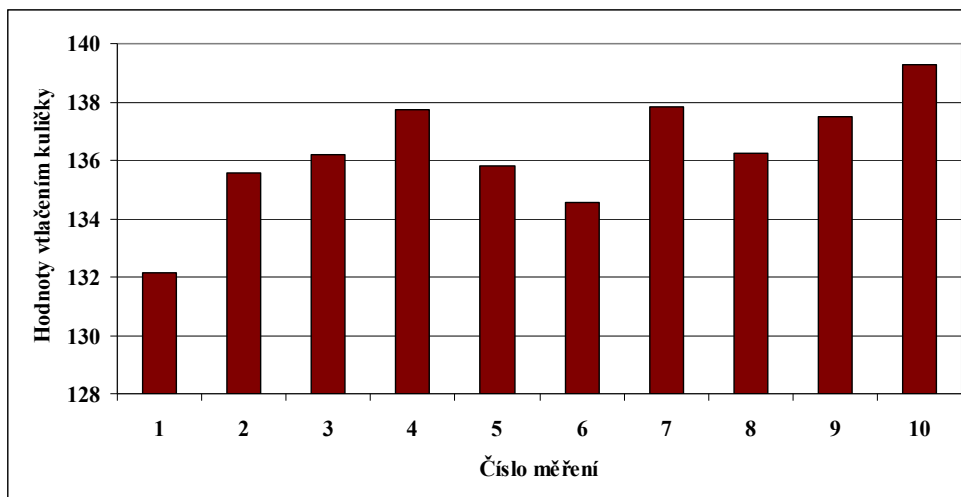
$s = 0,63$ HB

n – číslo měření

HB – tvrdost metodou vtláčením kuličky

\bar{x} – aritmetický průměr

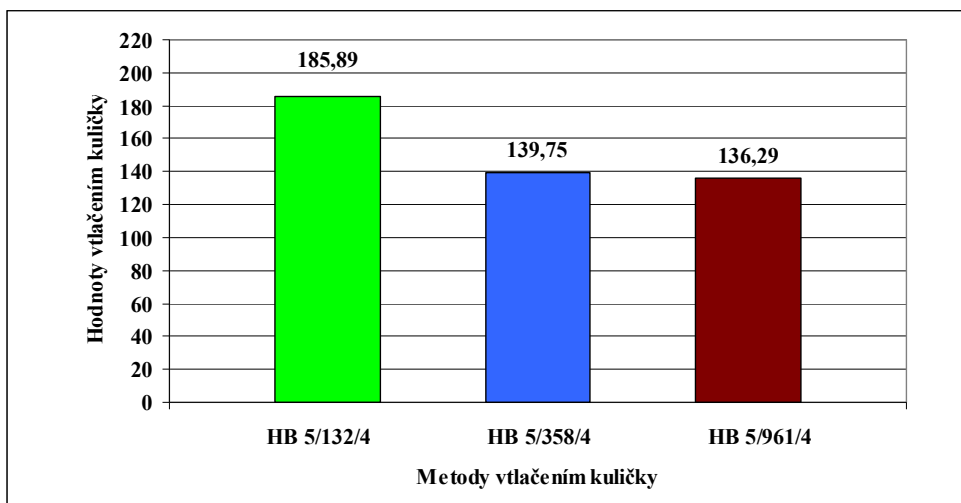
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 61. Naměřené hodnoty pro PC regranulát zkouškou HB 5/961/4

Z naměřených hodnot vyplývá, že výsledná tvrdost určená aritmetickým průměrem metodou vtláčením kuličky o celkovém zatížení 961 N pro PC regranulát je $136,29 \pm 0,63$ HB (tab. 51 a obr. 61).

Na obrázku 62 jsou porovnány výsledné hodnoty pro PC regranulát metodou vtláčením kuličky získané aritmetickým průměrem.



Obr. 62. Porovnání tvrdosti PC regranulátu metodou vtláčením kuličky

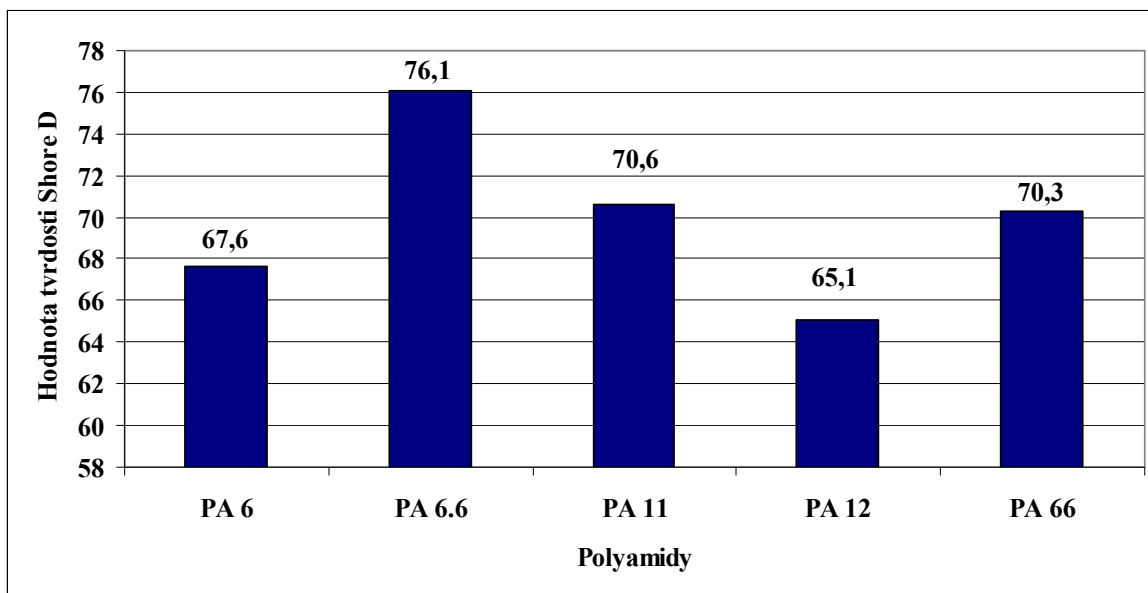
3 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V experimentální části byly provedeny zkoušky tvrdosti na deseti různých typech polymerů z polyamidové a polyesterové skupiny. Z polyamidové skupiny byly vybrány Polyamid 6, Polyamid 6.6, Polyamid 11, Polyamid 12 a Polyamid 66. Z polyesterové skupiny byl vybrán Polybutyltereftalát, Polykarbonát, Polykarbonát s 20 % skelných vláken, Polykarbonát s 30 % skelných vláken a Polykarbonát regenerulát.

Měření tvrdosti bylo realizováno metodou Shore se sondou D a metodou vtlačení kuličky. U metody vtlačení kuličky bylo použito celkem třech různých celkových zatížení. V prvním případě bylo celkové zatížení 132 N, ve druhém 358 N a ve třetím 961 N.

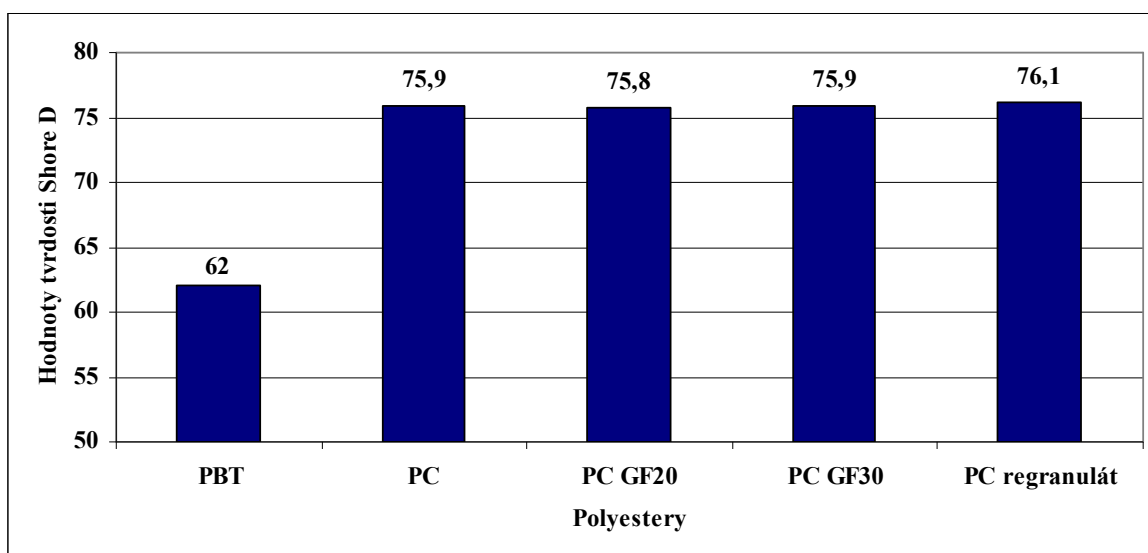
Každý vzorek byl změřen desetkrát na deseti různých místech. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány.

Na obrázku 63 jsou porovnány výsledné tvrdosti metodou Shore D pro polyamidovou skupinu. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšší tvrdostí vykazuje polyamid 6.6 o hodnotě 76,1 HShD, následuje PA 11 o hodnotě 70,6 HShD, PA 66 o hodnotě 70,3 HShD a PA 6 o hodnotě 67,6 HShD. Nejnižší tvrdost má PA 12 o hodnotě 65,1 HShD. Hodnoty tvrdosti odpovídají danému chemickému složení jednotlivých typů polyamidů a jejich vlastnostem.



Obr. 63. Porovnání tvrdosti polyamidu metodou Shore D

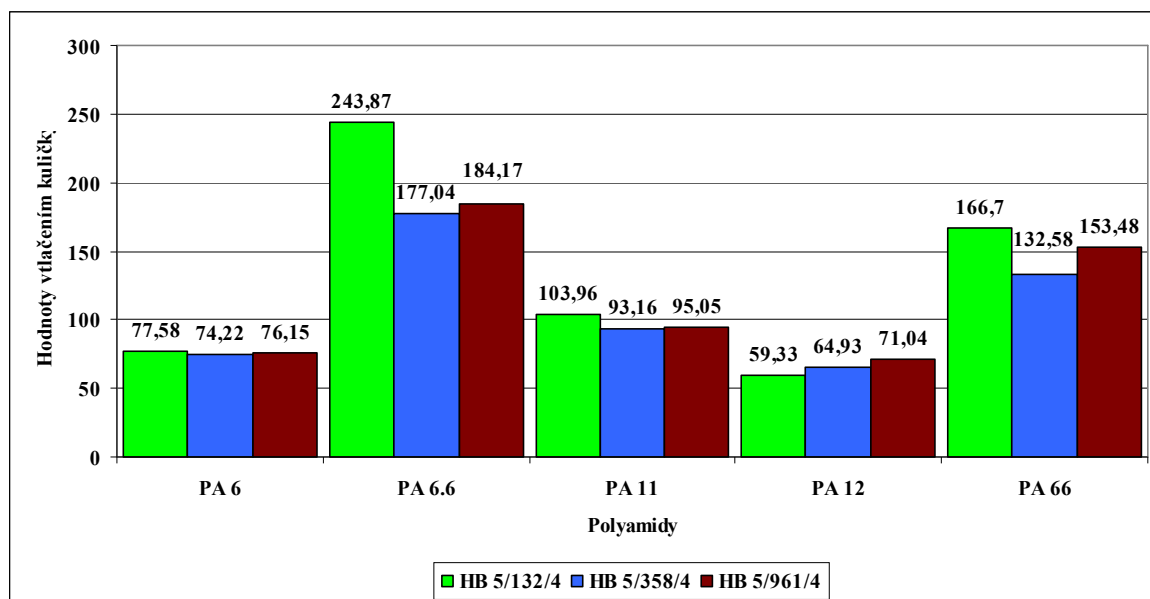
Na obrázku 64 jsou porovnány výsledné tvrdosti metodou Shore D pro polyesterovou skupinu. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejnižší tvrdosti dosáhl polybutyltereftalát o hodnotě 62 HShD a zbytek polymerů v této skupině dosáhl hodnoty pohybující se kolem 75,9 HShD. Nejvyšší tvrdosti dosahuje PC regranulát o hodnotě 76,1 HShD. Z toho vyplývá, že tvrdost materiálu z velké míry nesouvisí s přísadovými prvky jako jsou skelná vlákna, respektive regranulát. Výsledné hodnoty tvrdosti polyesterové skupiny odpovídají daným typům zvolených polymerů. Při pohledu na výsledné tvrdosti zobrazené na obrázku 64 je vidět výrazný pokles tvrdosti u PBT, což je dáno chemickým složením a vlastnostmi. PC naopak vykazuje vysoké hodnoty tvrdosti a pokud je vyztužen regranulátem, pak dosáhne nejvyšší hodnoty tvrdosti.



Obr. 64. Porovnání tvrdosti polyesteru metodou Shore D

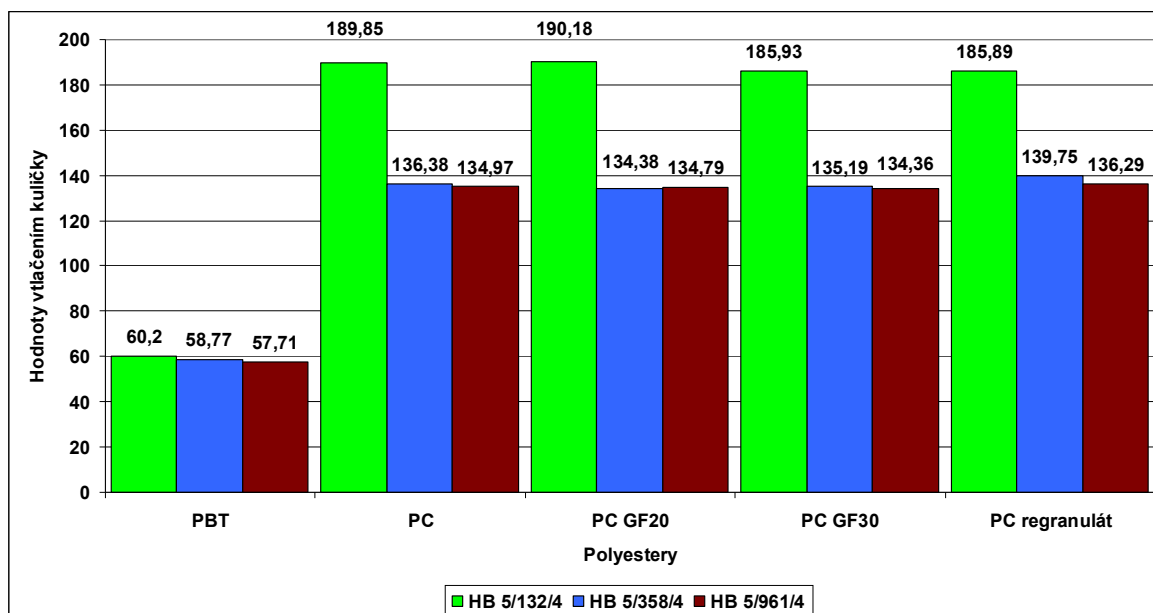
Na obrázku 65 jsou graficky porovnány výsledné tvrdosti metodou vtlačení kuličky pro polyamidovou skupinu. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšší tvrdosti o celkovém zatížení 132 N dosáhl PA 6.6 o hodnotě 243,87 HB, následuje PA 66 o hodnotě 166,7 HB, PA 11 o hodnotě 103,96 HB a PA 6 o hodnotě 77,58 HB. Nejnižší tvrdosti dosáhl PA 12 o hodnotě 59,33 HB. Nejvyšší tvrdosti o celkovém zatížení 358 N dosáhl PA 6.6 o hodnotě 177,04 HB, následuje PA 66 o hodnotě 132,58 HB, PA 11 o hodnotě 93,16 HB a PA 6 o hodnotě 74,22 HB. Nejnižší tvrdosti dosáhl PA 12 o hodnotě 64,93 HB. Nejvyšší tvrdosti o celkovém zatížení 961 N dosáhl PA 6.6 o hodnotě 184,17 HB, následuje PA 66 o hodnotě 153,48 HB, PA 11 o hodnotě 95,05 HB a PA 6 o hodnotě 76,15 HB. Nejnižší tvrdosti dosáhl PA 12 o hodnotě 71,04 HB. Z polyamidové skupiny se jeví jako nejtvrdší polymer PA

6.6, u kterého jsme naměřili nejvyšší hodnoty u všech třech celkových zatížení. Následuje PA 66, PA 11 a PA 6. Nejnižší tvrdosti u všech třech celkových zatížení dosáhl PA 12.



Obr. 65. Porovnání polyamidů metodou vtláčením kuličky

Na obrázku 66 jsou graficky porovnány výsledné tvrdosti metodou vtláčením kuličky pro polyesterovou skupinu. Nejvyšší tvrdost o celkovém zatížení 132 N dosáhl PC GF20 o hodnotě 190,18 HB, následuje PC o hodnotě 189,85 HB, PC GF30 o hodnotě 185,93 HB a PC regranulát o hodnotě 185,89 HB. Nejnižší tvrdost dosáhl PBT o hodnotě 60,2 HB. Nejvyšší tvrdost o celkovém zatížení 358 N dosáhl PC regranulát o hodnotě 139,75 HB, následuje PC o hodnotě 136,38 HB, PC GF30 o hodnotě 135,19 HB a PC GF20 o hodnotě 134,38 HB. Nejnižší tvrdost dosáhl PBT o hodnotě 58,77 HB. Nejvyšší tvrdost o celkovém zatížení 961 N dosáhl PC regranulát o hodnotě 136,29 HB, následuje PC o hodnotě 134,97 HB, PC GF20 o hodnotě 134,79 HB a PC GF30 o hodnotě 134,36 HB. Nejnižší tvrdost dosáhl PBT o hodnotě 57,71 HB. Pro polyesterovou skupinu z naměřených hodnot vyplývá, že Polycarbonáty různých složení mají téměř stejné výsledné hodnoty u všech třech celkových zatížení. Při pohledu na výsledné tvrdosti zobrazené na obrázku 66 je vidět výrazný pokles tvrdosti u PBT, což je dáno chemickým složením a vlastnostmi. PC naopak vykazuje vysoké hodnoty tvrdosti.



Obr. 66. Porovnání polyesterů metodou vtláčením kuličky

Při porovnání tvrdosti naměřených hodnot se osvědčila jak metoda Shore D, tak metoda vtláčením kuličky o všech třech různých celkových zatížení. Metodou Shore D byly změřeny bez jakýchkoliv problémů vzorky z polyamidu i z polyesteru. Hodnoty se pohybují v rozmezí od 62 HShD do 77 HShD z čehož vyplývá, že tato metoda je vhodná pro tyto materiály. Metoda vtláčením kuličky o celkovém zatížení 132 N se jeví také jako vhodná pro zjišťování tvrdosti u těchto polymeru avšak s porovnáním s metodami vtláčením kuličky o celkovém zatížení 358N a 961N je vhodná spíše pro měkčí materiály, kde se hodnoty téměř shodují s vyššími celkovými zatíženími. Metody vtláčením kuličky o celkovém zatížení 358 N a 961 N se jeví velice vhodné pro tyto materiály, protože vykazují téměř stejné naměřené hodnoty.

ZÁVĚR

Bakalářská práce řeší problém měření tvrdosti polymeru. Celkem bylo vybráno deset různých druhů polymerů z polyamidové a polyesterové skupiny. Z polyamidové skupiny byly vybrány Polyamid 6, Polyamid 6.6, Polyamid 11, Polyamid 12 a Polyamid 66. Z polyesterové skupiny byly vybrány Polybutylentereftalát, Polykarbonát, Polykarbonát s 20% skelných vláken, Polykarbonát s 30% skelných vláken a Polykarbonát regranulát. Jednotlivé skupiny byly vyhodnoceny zvlášť. Každý zkušební vzorek byl změřen desetkrát na deseti různých místech metodou Shore se sondou D a metodou vtačením kuličky, kde byly použita celkem tři různá celková zatížení.

Měřením získané hodnoty všech typů zkoušek byly sepsány do tabulek a graficky vyhodnoceny. Jednotlivé výsledky měření byly mezi sebou porovnány.

Při analýze výsledku se jeví jako velice vhodná metoda pro měření polyamidu a polyesterů metoda podle Shoreho se sondou D. Touto metodou byly bez problému změřeny všechny zkušební vzorky. Z polyamidové skupiny dosáhl nejnižší tvrdosti Polyamid 12 o hodnotě 65,1 HShD, následoval Polyamid 6 o hodnotě 67,6 HShD. Téměř stejné hodnoty byly naměřeny pro Polyamid 11 (70,6 HShD) a Polyamid 66 (70,3 HShD). Nejtvrdší polymer této skupiny je Polyamid 6.6 o hodnotě 76,1 HShD. Z polyesterové skupiny vyčníval pouze Polybutylentereftalát o hodnotě 62 HShD. U ostatních polymerů této skupiny, tedy polykarbonáty různé modifikace, byly naměřeny téměř stejné hodnoty pohybující se okolo 75,9 HShD.

Druhou zkouškou tvrdosti byla vybrána metoda vtačením kuličky se třemi různými celkovými zatíženími. Celkové zatížení 132 N se jeví jako vhodná pro měkčí materiály. U tvrdších materiálů se získané hodnoty poněkud více rozcházely s hodnotami získanými s celkovými zatíženími 358 N a 961 N. U měkčích materiálů byly naměřené hodnoty téměř totožné. Hodnoty získané při použití celkového zatížení 358 N a 961 N se u všech materiálu téměř shodovaly. Metodou vtačením kuličky byly bez problémů změřeny všechny vzorky a jeví se také jako vhodná. Z polyesterové skupiny opět vyčníval pouze Polybutylentereftalát o nejnižší hodnotě tvrdosti. Naměřené hodnoty u Polykarbonátu a jeho modifikacemi byly téměř totožné. Z naměřených hodnot tvrdosti metodou Shore D a metodou vtačením kuličky u polykarbonátu vyplývá, že z velké míry nezáleží na přísadových složkách.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN ISO 48. *Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tvrdosti (tvrdost mezi 10 IRHD a 100 IRHD)*. Praha : Český normalizační institut, 2008. 24 s.
- [2] ČSN EN ISO 291. *Plasty – standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 12s.
- [3] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtláčováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha : Český normalizační institut, 2003. 12 s.
- [4] ČSN EN ISO 2039-1. *Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1 : Metoda vtláčením kuličky*. Praha : Český normalizační institut, 2003. 12 s.
- [5] ČSN EN ISO 2039-2. *Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 2 : Tvrdost dle Rockwella*. Praha : Český normalizační institut, 2000. 12 s.
- [6] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. *Stojírenská technologie 1 - 1. díl : Nauka o materiálu* . 3. vyd. Praha : Scientia, 2002. 266 s.
- [7] JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů* . 2. vyd. Pardubice : Vysoká škola chemicko-technologická v Pardubicích, 1984. 105 s.
- [8] RYBNÍKÁŘ, František a kolektiv. *Analýza a zkoušení plastických hmot* . 1. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 420 s.
- [9] MACEK, Karel, ZUNA, Petr. *Nauka o materiálu I* . 1. vyd. Praha : SNTL-nakladatelství technické literatury, 1984. 120 s.
- [10] SCHATZ, Miroslav, VONDRÁČEK, Petr. *Zkoušení polymeru* . 1. vyd. Praha : SNTL-nakladatelství technické literatury, 1979. 264 s.
- [11] LUDVÍK, Jan, BÍLEK, Karel, LUDVÍK Štěpán. *Zkoušky tvrdosti* . 3. vyd. Kladno : Metrotest Kladno. 22 s.
- [12] Skúšky tvrdosti [online]. 2010, [cit. 2010-5-1].
<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>
- [13] MLEZIVA, Josef, ŠŇUPÁNEK, Jaromír. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití* . 2. vyd. Praha : Sobotáles, 2000. 537 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BS	Anglická norma.
ČSN	Česká norma.
D	Průměr měřicí kuličky.
d	Průměr vtisku.
d ₁	Délka úhlopříčky.
d ₂	Délka úhlopříčky.
d _{1,2}	Aritmetický průměr úhlopříček.
DIN	Německá norma.
e	Hloubka vtisku.
F	Zkušební síla.
F ₀	Počáteční zkušební zatížení.
F ₁	Přídavné zkušební zatížení.
F _r	Redukované zkušební zatížení.
H	Značka tvrdosti.
h	Hloubka vtisku.
h ₁	Reverzibilní (vratná) hloubka vtisku.
h ₂	Ireverzibilní (nevratná) hloubka vtisku.
H _A	Hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu A.
H _D	Hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu D.
HB	Tvrdost podle Brinella.
HMa	Tvrdost podle Martense.
HR	Tvrdost podle Rockwella.
h _r	Redukovaná hloubka vtláčení, která má hodnotu 0,25mm.
HSh	Tvrdost podle Shoreho.

HV	Tvrdość podle Vickerse.
IRHD	International Rubber Hardness Degrese (mezinárodní stupnice tvrdosti).
ISO	Mezinárodní norma.
Ma	Martens.
n	Číslo měření.
PA	Polyamid.
PC	Polykarbonát.
PBT	Polybutylentereftalát.
s	empirická směrodatná odchylka
S	Plocha vtisku.
STN	Slovenská norma.
\bar{x}	Aritmetický průměr.
x_i	I-tá hodnota měřené veličiny.
α	Konstanta, která má hodnotu 0,21.
°	Symbol metody IRHD.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. <i>Princip metody vtlačení kuličky [12]</i>	15
Obr. 2. <i>Průběh zkušebního zatížení – metoda Brinell</i>	19
Obr. 3. <i>Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Brinella [6]</i>	19
Obr. 4. <i>Zobrazení metody diamantovým hrotem – čtyřbokým jehlanem [12]</i>	21
Obr. 5. <i>Průběh zkušebního zatížení – metoda Vickers [11]</i>	23
Obr. 6. <i>Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Vickerse [6]</i>	23
Obr. 7. <i>Zobrazení metody vtlačení kuličky podle Rockwella [12]</i>	25
Obr. 8. <i>Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Rockwella [6]</i>	27
Obr. 9. <i>Zkušební hrot tvrdoměru typu A a typu D [3]</i>	29
Obr. 10. <i>Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Shore</i>	31
Obr. 11. <i>OMAG Affri ART 13</i>	38
Obr. 12. <i>Afri integral 2E</i>	39
Obr. 13. <i>Naměřené hodnoty pro PA 6 zkouškou Shore D</i>	41
Obr. 14. <i>Naměřené hodnoty pro PA 6 zkouškou HB 5/132/4</i>	42
Obr. 15. <i>Naměřené hodnoty pro PA 6 zkouškou HB 5/358/4</i>	43
Obr. 16. <i>Naměřené hodnoty pro PA 6 zkouškou HB 5/961/4</i>	44
Obr. 17. <i>Porovnání tvrdosti PA 6 metodou vtlačení kuličky</i>	44
Obr. 18. <i>Naměřené hodnoty pro PA 6.6 zkouškou Shore D</i>	45
Obr. 19. <i>Naměřené hodnoty pro PA 6.6 zkouškou HB 5/132/4</i>	46
Obr. 20. <i>Naměřené hodnoty pro PA 6.6 zkouškou HB 5/358/4</i>	47
Obr. 21. <i>Naměřené hodnoty pro PA 6.6 zkouškou HB 5/961/4</i>	48
Obr. 22. <i>Porovnání tvrdosti PA 6.6 metodou vtlačení kuličky</i>	49
Obr. 23. <i>Naměřené hodnoty pro PA 11 zkouškou Shore D</i>	50
Obr. 24. <i>Naměřené hodnoty pro PA 11 zkouškou HB 5/132/4</i>	51
Obr. 25. <i>Naměřené hodnoty pro PA 11 zkouškou HB 5/358/4</i>	52
Obr. 26. <i>Naměřené hodnoty pro PA 11 zkouškou HB 5/961/4</i>	53
Obr. 27. <i>Porovnání tvrdosti PA 11 metodou vtlačení kuličky</i>	53
Obr. 28. <i>Naměřené hodnoty pro PA 12 zkouškou Shore D</i>	54
Obr. 29. <i>Naměřené hodnoty pro PA 12 zkouškou HB 5/132/4</i>	55
Obr. 30. <i>Naměřené hodnoty pro PA 12 zkouškou HB 5/358/4</i>	56
Obr. 31. <i>Naměřené hodnoty pro PA 12 zkouškou HB 5/961/4</i>	57

Obr. 32. Porovnání tvrdosti PA 12 metodou vtlačení kuličky.....	58
Obr. 33. Naměřené hodnoty pro PA 66 zkouškou Shore D	59
Obr. 34. Naměřené hodnoty pro PA 66 zkouškou HB 5/132/4	60
Obr. 35. Naměřené hodnoty pro PA 66 zkouškou HB 5/358/4	61
Obr. 36. Naměřené hodnoty pro PA 66 zkouškou HB 5/961/4	62
Obr. 37. Porovnání tvrdosti PA 66 metodou vtlačení kuličky.....	62
Obr. 38. Naměřené hodnoty pro PBT zkouškou Shore D	64
Obr. 39. Naměřené hodnoty pro PBT zkouškou HB 5/132/4.....	65
Obr. 40. Naměřené hodnoty pro PBT zkouškou HB 5/358/4.....	66
Obr. 41. Naměřené hodnoty pro PBT zkouškou HB 5/961/4.....	67
Obr. 42. Porovnání tvrdosti PBT metodou vtlačení kuličky	67
Obr. 43. Naměřené hodnoty pro PC zkouškou Shore D	68
Obr. 44. Naměřené hodnoty pro PC zkouškou HB 5/132/4.....	69
Obr. 45. Naměřené hodnoty pro PC zkouškou HB 5/358/4.....	70
Obr. 46. Naměřené hodnoty pro PC zkouškou HB 5/961/4.....	71
Obr. 47. Porovnání tvrdosti PC metodou vtlačení kuličky	72
Obr. 48. Naměřené hodnoty pro PC GF20 zkouškou Shore D.....	73
Obr. 49. Naměřené hodnoty pro PC GF20 zkouškou HB 5/132/4.....	74
Obr. 50. Naměřené hodnoty pro PC GF20 zkouškou HB 5/358/4.....	75
Obr. 51. Naměřené hodnoty pro PC GF20 zkouškou HB 5/961/4.....	76
Obr. 52. Porovnání tvrdosti PC GF20 metodou vtlačení kuličky	76
Obr. 53. Naměřené hodnoty pro PC GF30 zkouškou Shore D.....	77
Obr. 54. Naměřené hodnoty pro PC GF30 zkouškou HB 5/132/4.....	78
Obr. 55. Naměřené hodnoty pro PC GF30 zkouškou HB 5/358/4.....	79
Obr. 56. Naměřené hodnoty pro PC GF30 zkouškou HB 5/961/4.....	80
Obr. 57. Porovnání tvrdosti PC GF30 metodou vtlačení kuličky	81
Obr. 58. Naměřené hodnoty pro PC regranulát zkouškou Shore D.....	82
Obr. 59. Naměřené hodnoty pro PC regranulát zkouškou HB 5/132/4	83
Obr. 60. Naměřené hodnoty pro PC regranulát zkouškou HB 5/358/4	84
Obr. 61. Naměřené hodnoty pro PC regranulát zkouškou HB 5/961/4	85
Obr. 62. Porovnání tvrdosti PC regranulátu metodou vtlačení kuličky.....	85
Obr. 63. Porovnání tvrdosti polyamidu metodou Shore D.....	86

Obr. 64. <i>Porovnání tvrdosti polyesteru metodou Shore D</i>	87
Obr. 65. <i>Porovnání polyamidů metodou vtlačení kuličky</i>	88
Obr. 66. <i>Porovnání polyesterů metodou vtlačení kuličky</i>	89

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. <i>Typy standardního prostředí [2]</i>	14
Tab. 2. <i>Průměr kuličky, zkušební zatížení a doba odečítání. [4]</i>	17
Tab. 3. <i>Přehled nejběžnějších norem pro metodu podle Brinella</i>	20
Tab. 4. <i>Podle použitého zatížení se metoda Vickers dělí do 3 skupin [6]</i>	22
Tab. 5. <i>Hodnoty předběžného zatížení, přidavných zatížení a průměru měřicí kuličky [5]</i>	26
Tab. 6. <i>Přehled nejběžnějších norem pro metodu dle Rockwella</i>	28
Tab. 7. <i>Přehled nejběžnějších norem pro metodu Shore</i>	31
Tab. 8. <i>Rozměry zkušebního zařízení a použité síly [1]</i>	33
Tab. 9. <i>Minimální vzdálenosti bodu měření od okrajů vzorků pro metody N, H a L [1]</i>	34
Tab. 10. <i>Přehled nejběžnějších norem pro metodu IRHD</i>	35
Tab. 11. <i>Mohsova stupnice tvrdosti [7]</i>	36
Tab. 12. <i>Hodnoty pro PA 6 naměřené zkouškou Shore D</i>	40
Tab. 13. <i>Hodnoty pro PA 6 naměřené zkouškou HB 5/132/4</i>	41
Tab. 14. <i>Hodnoty pro PA 6 naměřené zkouškou HB 5/358/4</i>	42
Tab. 15. <i>Hodnoty pro PA 6 naměřené zkouškou HB 5/961/4</i>	43
Tab. 16. <i>Hodnoty pro PA 6.6 naměřené zkouškou podle Shore D</i>	45
Tab. 17. <i>Hodnoty pro PA 6.6 naměřené zkouškou HB 5/132/4</i>	46
Tab. 18. <i>Hodnoty pro PA 6.6 naměřené zkouškou HB 5/358/4</i>	47
Tab. 19. <i>Hodnoty pro PA 6.6 naměřené zkouškou HB 5/961/4</i>	48
Tab. 20. <i>Hodnoty pro PA 11 naměřené zkouškou podle Shore D</i>	49
Tab. 21. <i>Hodnoty pro PA 11 naměřené zkouškou HB 5/132/4</i>	50
Tab. 22. <i>Hodnoty pro PA 11 naměřené zkouškou HB 5/358/4</i>	51
Tab. 23. <i>Hodnoty pro PA 11 naměřené zkouškou HB 5/961/4</i>	52
Tab. 24. <i>Hodnoty pro PA 12 naměřené zkouškou podle Shore D</i>	54
Tab. 25. <i>Hodnoty pro PA 12 naměřené zkouškou HB 5/132/4</i>	55
Tab. 26. <i>Hodnoty pro PA 12 naměřené zkouškou HB 5/358/4</i>	56
Tab. 27. <i>Hodnoty pro PA 12 naměřené zkouškou HB 5/961/4</i>	57
Tab. 28. <i>Hodnoty pro PA 66 naměřené zkouškou podle Shore D</i>	58
Tab. 29. <i>Hodnoty pro PA 66 naměřené zkouškou HB 5/132/4</i>	59

Tab. 30. Hodnoty pro PA 66 naměřené zkouškou HB 5/358/4.....	60
Tab. 31. Hodnoty pro PA 66 naměřené zkouškou HB 5/961/4.....	61
Tab. 32. Hodnoty pro PBT naměřené zkouškou podle Shore D	63
Tab. 33. Hodnoty pro PBT naměřené zkouškou HB 5/132/4.....	64
Tab. 34. Hodnoty pro PBT naměřené zkouškou HB 5/358/4.....	65
Tab. 35. Hodnoty pro PBT naměřené zkouškou HB 5/961/4.....	66
Tab. 36. Hodnoty pro PC naměřené zkouškou podle Shore D	68
Tab. 37. Hodnoty pro PC naměřené zkouškou HB 5/132/4.....	69
Tab. 38. Hodnoty pro PC naměřené zkouškou HB 5/358/4.....	70
Tab. 39. Hodnoty pro PC naměřené zkouškou HB 5/961/4.....	71
Tab. 40. Hodnoty pro PC GF20 naměřené zkouškou podle Shore D	72
Tab. 41. Hodnoty pro PC GF20 naměřené zkouškou HB 5/132/4.....	73
Tab. 42. Hodnoty pro PC GF20 naměřené zkouškou HB 5/358/4.....	74
Tab. 43. Hodnoty pro PC GF20 naměřené zkouškou HB 5/961/4.....	75
Tab. 44. Hodnoty pro PC GF30 naměřené zkouškou podle Shore D	77
Tab. 45. Hodnoty pro PC GF30 naměřené zkouškou HB 5/132/4.....	78
Tab. 46. Hodnoty pro PC GF30 naměřené zkouškou HB 5/358/4.....	79
Tab. 47. Hodnoty pro PC GF30 naměřené zkouškou HB 5/961/4.....	80
Tab. 48. Hodnoty pro PC regranulát naměřené zkouškou podle Shore D.....	81
Tab. 49. Hodnoty pro PC regranulát naměřené zkouškou HB 5/132/4	82
Tab. 50. Hodnoty pro PC regranulát naměřené zkouškou HB 5/358/4	83
Tab. 51. Hodnoty pro PC regranulát naměřené zkouškou HB 5/961/4	84