

# Měření tvrdosti polymerů

Patrik Šťastný

---

Bakalářská práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Patrik ŠŤASTNÝ**  
Osobní číslo: **T08660**  
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Měření tvrdosti polymerů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární studie na dané téma**
- 2. Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část**
- 3. Provedení experimentu**
- 4. Vyhodnocení naměřených výsledků**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího BP**

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


Datum zadání bakalářské práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2011**

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 31. května 2011

.....  


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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je poskytnout ucelený přehled nejčastěji používaných metod pro měření tvrdosti polymerů. V teoretické části je popsána podstata zkoušek, postup měření a jsou zde specifikovány zkušební vzorky pro jednotlivé metody. Praktická část je zaměřena na provedení vlastního měření tvrdosti zkušebních vzorků pomocí vybraných metod, zpracování a vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova: měření tvrdosti, tvrdost polymeru, metoda vtlačení kuličky, Rockwell, Vickers, Shore, IRHD.

## **ABSTRACT**

The aim of this bachelor thesis is to provide compact view of the most frequently used methods for measuring the hardness of polymers. In the theoretic part is described the principle of the tests, measuring procedure and are here specified test samples for individual method. The practical part focuses on the implementation of the measurement of hardness of samples using selected methods, processing and interpretation of results.

Keywords: measuring of hardness, hardness of the polymer, Ball indentation method, Rockwell, Vickers, Shore, IRHD.

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky a za veškerou pomoc poskytnutou při zpracování této bakalářské práce.

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

Ve Zlíně 31. května 2011

  
.....

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ZKOUŠKY TVRDOSTI</b> .....	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLNÍ ZKOUŠEK TVRDOSTI .....	12
1.1.1 Podle principu zkoušky .....	12
1.1.2 Podle rychlosti působení zatěžující síly .....	13
1.1.3 Podle účelu měření .....	14
1.2 METODA VTLAČENÍM KULIČKY .....	14
1.2.1 Podstata zkoušky .....	14
1.2.2 Postup zkoušky.....	16
1.2.3 Vyhodnocení zkoušky .....	17
1.2.4 Vnikací tělesa a zkušební zatížení.....	18
1.2.5 Zkušební vzorky.....	19
1.3 TVRDOST DLE ROCKWELLA.....	19
1.3.1 Podstata zkoušky .....	20
1.3.2 Postup zkoušky.....	21
1.3.3 Vyhodnocení zkoušky .....	22
1.3.4 Vnikací tělesa a zkušební zatížení.....	22
1.3.5 Zkušební vzorky.....	23
1.3.6 Rockwell $\alpha$ .....	23
1.4 TVRDOST DLE VICKERSE .....	25
1.4.1 Podstata zkoušky .....	25
1.4.2 Postup zkoušky.....	27
1.4.3 Vyhodnocení zkoušky .....	28
1.4.4 Vnikací tělesa a zkušební zatížení.....	29
1.4.5 Zkušební vzorky.....	29
1.5 TVRDOST SHORE .....	30
1.5.1 Podstata zkoušky .....	30
1.5.2 Postup zkoušky.....	30
1.5.3 Vyhodnocení zkoušky .....	31
1.5.4 Vnikací tělesa a zkušební zatížení.....	31
1.5.5 Zkušební vzorky.....	32
1.6 METODA IRHD .....	32
1.6.1 Podstata zkoušky .....	33
1.6.2 Postup zkoušky.....	34
1.6.3 Vyhodnocení zkoušky .....	35
1.6.4 Vnikací tělesa a zkušební zatížení.....	35
1.6.5 Zkušební vzorky.....	36
1.7 OSTATNÍ METODY .....	37
1.7.1 Tvrdoměr Barcol .....	37
1.7.2 Mikrotvrdost.....	39
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>40</b>
<b>2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>41</b>



2.1	CÍL PRÁCE .....	41
2.2	ZKUŠEBNÍ VZORKY A POUŽITÉ METODY .....	41
2.3	POSTUP MĚŘENÍ.....	42
2.4	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	43
2.4.1	PP-2300-30 kGy.....	44
2.4.2	PP-2300-45 kGy.....	45
2.4.3	PP-2300-60 kGy.....	46
2.4.4	PP-2300-90 kGy.....	47
2.4.5	PP-256F-45 kGy.....	48
2.4.6	PP-256F-60 kGy.....	49
2.4.7	PP-256F-90 kGy.....	50
2.4.8	PP-50-20° .....	51
2.4.9	PP-50-60° .....	52
2.4.10	PP-50-100° .....	53
2.4.11	PP-plněný 25%.....	54
2.4.12	PP-neplněný .....	55
2.4.13	PE-DOW-20° .....	56
2.4.14	PE-DOW-60° .....	57
2.4.15	PE-DOW-100° .....	58
2.4.16	PBT-neozářený.....	59
2.4.17	Polystyren.....	60
2.4.18	PA 6-neplněný.....	61
2.4.19	TPE.....	62
2.4.20	HDPE .....	63
<b>3</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>64</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>78</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>80</b>

## ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti polymerních materiálů. Polymery patří v současné době k velmi významným materiálům, a to díky svému širokému uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. A z tohoto důvodu je velmi důležité znát jejich mechanické vlastnosti. Jednou ze základních a často vyhodnocovaných vlastností je tvrdost. Můžeme ji definovat jako odpor proti vnikání cizího tělesa. Tvrdost je důležitá také z toho důvodu, že na základě její znalosti můžeme odvodit i další mechanické vlastnosti, jako například pevnost v tahu.

Pro měření tvrdosti materiálů se využívá celá řada různých metod. Neexistuje však metoda, která by byla univerzálně použitelná pro všechny druhy materiálů a zároveň poskytovala smysluplné výsledky. Výběr vhodné metody není jednoduchou záležitostí, vždy je nutné brát v potaz několik hledisek. Metody se rozdělují podle principu (vnikací, vrypové, odrazové) a podle rychlosti působení zatěžující síly (statické, dynamické).

Teoretická část této bakalářské práce se zabývá popisem jednotlivých metod měření tvrdosti polymerních materiálů. Nejprve je zde uvedeno rozdělení těchto metod a dále se již práce zabývá nejdůležitější skupinou metod, a to metodami vnikacími. Byly vybrány nejběžněji používané, a zároveň ČSN normou specifikované, zkoušky. U těchto metod je popsána jejich podstata, vysvětlen pracovní postup, včetně vyhodnocení výsledků, dále jsou zde specifikována používaná vnikací tělesa, zkušební zatížení a zkušební vzorky.

Praktická část je již zaměřena na použití konkrétních metod měření tvrdosti skupiny vybraných materiálů. Pro měření tvrdosti byly zvoleny následující metody: SHORE A, SHORE D a metoda vtlačení kuličky (BIM) pro zatížení 132 N a 358 N. Měření bylo realizováno na skupině 20 vzorků a pro každý vzorek provedeno 30 krát. Naměřená data byla vyhodnocena, poté zpracována do grafů a vzájemně porovnána.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Obecně je tvrdost definována jako odpor, který klade materiál proti vniknutí jiného, tvrdšího tělesa. Tedy vlastností spíše povrchu materiálů a první stupnice tvrdosti (např. Mohsova, Kohinoor) byly založeny na tom, zda zanechává určitý tvrdostní standard ve zkoušeném vzorku stopy po vrypu. Polymerní materiály jsou však houževnaté, v případě pryže i pružné a jejich povrchy se více či méně deformují. Postupem času se proto zkoušky tvrdosti vyvinuly v měření odporu celého objemu proti vtlačování tvrdých těles definovaných tvarů. Při odporu celého objemu je tvrdost vyjádřením tuhosti a u některých metod jsou dosahovány dobré korelace mezi tvrdostí a modulem pružnosti. Protože pryž má značně nižší modul pružnosti a rozdílné deformační vlastnosti, jsou konstruovány zvlášť přístroje na stanovení tvrdosti pryže a jiné pro měření tuhých sklovitých polymerů. [9]

Hodnoty tvrdosti se mohou uvádět buď bez jednotek, nebo u těch, které jsou založeny na vztahu mezi zatížením a plochou vtisku se používá jednotky MPa. Poněvadž může snadno dojít k záměně s hodnotou pevnosti, udávají se hodnoty bez jednotky, pouze s uvedením způsobu měření nebo použité stupnice. Tvrdost se označuje symbolem  $H$  (z anglického slova *hardness* = tvrdost). [6]

Protože se při provádění zkoušek zkoušený dílec neporuší, jsou zkoušky tvrdosti vhodné i pro zkoušení hotových výrobků. Hodnoty tvrdosti jsou závislé na době působení cizího tělesa, na jeho vlastnostech a rozměrech, velikosti zatížení, elastických vlastnostech zkoušeného materiálu a na teplotě při zkoušce. [8]

### 1.1 Rozdělní zkoušek tvrdosti

Základní zkoušky, které jsou dnes k měření tvrdosti používány, je možno dělit podle několika různých hledisek:

#### 1.1.1 Podle principu zkoušky

##### Vnikací metody

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

Do této skupiny patří např.: Brinell, metoda vtlačováním kuličky, Rockwell, Vickers, Knoop, Shore A a D, IRHD, Poldi kladívko, Baumannovo kladívko, atd. [14]

### **Vrypové metody**

Při těchto zkouškách se do vyleštěného povrchu zkoušeného materiálu rýpe diamantovým tělískem určitého definovaného tvaru zatíženým závažím. Hodnota tvrdosti se určí z šířky vrypu – Martensova metoda. Lze také využít Mohseovy stupnice tvrdosti, ve které je seřazeno 10 nerostů od nejměkčího mastku až po nejtvrďší diamant. Tyto zkoušky nejsou normalizované a v praxi se téměř nepoužívají. [14]

### **Odrazové metody**

Princip těchto metod je založen na odrazu padajícího tělíska určitého tvaru a hmotnosti od zkoušeného vzorku. Část kinetické energie tělíska je vynaložena na elastickou deformaci povrchu materiálu a zbytek energie se spotřebuje na odražení tělíska zpět do určité výšky. Tvrdost se určí z výšky odrazu (Shoreho skleroskop). Používá se při zkoušení velmi tvrdých materiálů. [14]

### **Kyvadlové metody**

Při těchto metodách se měří úbytek energie kyvadla s kuličkou, které zvětšuje předem vytvořený vtisk ve zkoušeném materiálu. Tyto metody nejsou často využívány. [14]

#### **1.1.2 Podle rychlosti působení zatěžující síly**

##### **Statické**

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

Do této skupiny patří např.: Brinell, metoda vtlačení kuličky, Rockwell, Vickers, Knoop, atd.

##### **Dynamické**

Zatěžující síla působí nárazově ve směru kolmém ke zkoušenému povrchu. Výhodou těchto zkoušek jsou menší rozměry přístrojů, což umožňuje snadnou přepravu ke zkoušenému předmětu a měření tvrdosti za provozních podmínek. Přesnost je nižší. [14]

Do této skupiny patří např.: Shoreho skleroskop, Poldi kladívko, Baumannovo kladívko.

### 1.1.3 Podle účelu měření

#### Zkoušky makrotvrdosti

Když se hodnotí tvrdost materiálu jako celku.

#### Zkoušky mikrotvrdosti

Určují tvrdost jednotlivých strukturních složek materiálu nebo tvrdost tenkých povrchových vrstev. [14]

## 1.2 Metoda vtlačení kuličky

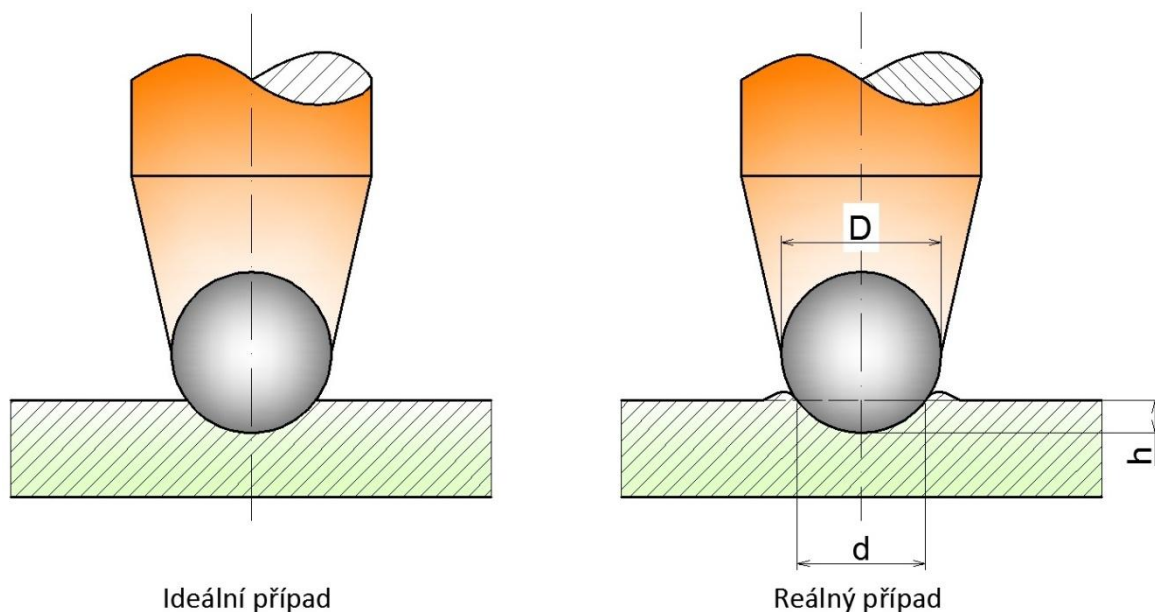
Dříve se k měření tvrdosti polymerů využívalo zkoušky podle Brinella stejně jako u kovů. Používaly se kuličky různého průměru, pro určité skupiny materiálů. Postupem času byla metoda upravena do dnešní podoby, kdy se používá již jen jeden průměr kuličky a různá zatížení. Metoda je specifikovaná v normě ČSN EN ISO 2039-1 (640619): Plasty - Stanovení tvrdosti - Část 1: Metoda vtlačení kuličky.

### 1.2.1 Podstata zkoušky

Metoda spočívá ve vtlačení kuličky pod specifikovaným zatížením do povrchu zkušební vzorku. Hloubka vtlačení se měří pod zatížením. Plocha vtlačení se vypočítá z jeho hloubky. Tvrdost vtlačení kuličky se poté vypočítá z následujícího vztahu:

Tvrdost vtlačení kuličky = Použité zatížení / Plocha vtlačení [3]

Jak je znázorněno na obrázku (Obr. 1) v ideálním případě nedochází k deformaci materiálu v okolí kuličky, ale v reálné situaci dojde k vytlačení okolního materiálu kolem kuličky a tento jev musíme uvažovat při hodnocení. Po odlehčení kuličky zůstane část měřené látky ireverzibilně deformována. Hloubku  $h$  pak můžeme rozložit do dvou složek: na složku reverzibilní  $h_{rev}$  a složku ireverzibilní  $h_{ir}$ . Reverzibilní složka deformace, která je elastického nebo viskoelastického charakteru souvisí přímo s Youngovým modulem  $E$  a Poissonovou konstantou  $\mu$ . Ireverzibilní složka deformace je pak ve vztahu k plastickému toku. Většina metod měření pracuje pouze s hodnotou  $h$  a obě složky od sebe neodděluje. Veškerá měření tedy platí, když  $h_{rev} \gg h_{ir}$ . [7]



Obr. 1. Princip metody vtláčením kuličky [7, 9]

### Zkušební zařízení

Při použití metody vtláčením kuličky se používá tvrdoměr, který se skládá z rámu s nastavitelnou základnou, ta je opatřena deskou pro uložení zkušebního tělesa, a měřicí kuličky s příslušnými nastavci a zařízením pro aplikaci zatížení bez rázu. Tvrdoměr musí být vybaven zařízením pro měření hloubky vtláčení měřicí kuličky v rozsahu 0,4 mm s přesností  $\pm 0,005$  mm. Při aplikaci maximálního napětí se rám nesmí deformovat o více než 0,05 mm. Tuto deformaci měříme podél hlavní osy použité síly. Měřicí kulička musí být vyrobena z leštěné tvrzené oceli a nesmí po zkoušce vykazovat žádnou deformaci či poškození. Průměr kuličky musí být  $(5,0 \pm 0,05)$  mm. Pro měření časových úseků využijeme stopky s přesností  $\pm 0,1$  s. [3]

Pro měření se v dnešní době nejvíce využívají univerzální tvrdoměry, na kterých lze měřit jak metodou vtláčením kuličky, tak i metodou Rockwell a dalšími. Příklad takového tvrdoměru je na obrázku (Obr. 2).



Obr. 2. Univerzální tvrdoměr M4U [17]

### 1.2.2 Postup zkoušky

Není-li uvedeno jinak, provádí se zkouška ve stejném prostředí, které se používá ke kondicionování zkušebních těles. Prostředí je specifikováno v normě ČSN EN ISO 291 (640204): Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení. [3]

Zkušební vzorek se umístí na opěrnou desku tak, aby na ní spočíval celým svým povrchem a aby jeho plochy byly kolmé ke směru působení zátěže. Aplikuje se počáteční zatížení  $F_0 = 9,8 \pm 0,1$  N v místě, které leží minimálně 10 mm od okraje zkušebního tělesa. Hloubkoměr se vynuluje a poté se zvolna bez rázu aplikuje zkušební zatížení  $F_m$  po dobu 2 až 3 sekund tak, aby dosažená hloubka vtlačení  $h$  po opravě na deformaci rámu ležela v rozsahu 0,15 mm až 0,35 mm. [3]



Leží-li hodnoty hloubky vtlačení po 30 s mimo tento rozsah (buď pro sérii několika zkušebních těles nebo pro jednotlivé zkušební těleso), změní se zkušební zatížení, aby se docílilo hloubky vtlačení v uvedeném rozsahu. Zaznamená se počet měření, při nichž nebylo dosaženo správné hloubky vtlačení. Po uplynutí 30 s působení zkušebního zatížení  $F_m$  se změří hloubka vtlačení pod zatížením  $h_1$ . [3]

Zkouška se provádí tak, aby výsledky nebyly ovlivněny žádnými bublinami nebo prasklinami ve zkušebním tělese. Provádí-li se na jednom zkušebním tělese několik stanovení, je nutné zajistit, aby místa aplikace měřicí kuličky byla vzdálena minimálně 10 mm od sebe navzájem i od okraje zkušebního tělesa. Provede se deset platných zkoušek na jednom nebo více zkušebních tělesech. [3]

### Stanovení deformace rámu přístroje $h_2$

Na opěrnou desku se umístí měkký měděný blok (o tloušťce alespoň 6 mm) a aplikuje se počáteční zatížení  $F_0$ . Hloubkoměr se vynuluje a aplikuje se zkušební zatížení  $F_m$ . Toto zkušební zatížení se udržuje do ustálení hloubkoměru. Zaznamená se hodnota, odstraní se zkušební zatížení a hloubkoměr se vynuluje.

Uvedený postup se opakuje tolikrát, až je při každé aplikaci zkušebního zatížení dosahováno na hloubkoměru stejné hodnoty. Toto je moment, kdy již nedochází k další penetraci kuličky do měděného bloku, a proto konstantní opakující se hodnota hloubky představuje posun hloubkoměru způsobený deformací rámu přístroje. Tato konstantní hodnota se zaznamená jako  $h_2$ . Opravená hloubka vtlačení  $h$  je dána vztahem  $h = h_1 - h_2$ . [3]

### 1.2.3 Vyhodnocení zkoušky

K výpočtu hodnoty tvrdosti se používá redukovaných hodnot  $F_r$  a  $h_r$  na hloubku vtisku 0,25 mm.

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

kde:  $HB$  – tvrdost vtlačení kuličky [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$F_r$  – redukované zkušební zatížení [N]

$h_r$  – redukovaná hloubka vtisku,  $h_r = 0,25$  mm

$D$  – průměr kuličky [mm]

$\pi$  – Ludolfovo číslo

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

kde:  $F_r$  – redukované zkušební zatížení [N]

$F_m$  – zkušební zatížení [N]

$h_r$  – redukovaná hloubka vtisku,  $h_r = 0,25$  mm

$h$  – hloubka vtisku [mm] [3]

Jestliže se měří průměr okraje důlku  $d$ , pak platí:

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

kde:  $h$  – hloubka vtisku [mm]

$D$  – průměr kuličky [mm]

$d$  – průměr okraje důlku [mm] [7]

Výsledky se zaokrouhlují dle následujících pravidel:

- hodnoty nižší než  $250 \text{ N/mm}^2$  se zaokrouhlí na jednotky  $\text{N/mm}^2$
- hodnoty vyšší než  $250 \text{ N/mm}^2$  se zaokrouhlí na desítky  $\text{N/mm}^2$

Výsledky se udávají ve formě např.  $HB 132 / 30 = 40 \text{ N/mm}^2$ , kde číselné hodnoty postupně představují zatížení v newtonech, dobu měření v sekundách a naměřenou tvrdost materiálu. [3]

#### 1.2.4 Vnikací tělesa a zkušební zatížení

Pro metodu vtlačování kuličky se využívá kuličky z leštěné tvrzené oceli. Její rozměr, zkušební zatížení a doba působení zatížení, jsou shrnuty v tabulce (Tab. 1):

Tab. 1. Pr. kuličky, zk. zatížení a doba jeho působení pro metodu vtlač. kuličky [3]

Průměr kuličky [mm]	Zkušební zatížení [N]	Doba působení zatížení [s]
5,00 ± 0,05	49 ± 1%	30
	132 ± 1%	
	358 ± 1%	
	961 ± 1%	

### 1.2.5 Zkušební vzorky

Zkušebním vzorkem musí být rovná hladká část desky tvaru hranolu o takové velikosti, aby byl minimalizován vliv okrajů na výsledky zkoušky; např. 20 mm x 20 mm. Odpovídající plochy zkušebního vzorku musí být rovnoběžné. Doporučuje se tloušťka 4 mm. Povrch zkušebního vzorku spočívající na desce nesmí po zkoušce vykazovat žádnou deformaci. Je-li tloušťka zkušebního vzorku menší než 4 mm, je možné vršit několik zkušebních vzorků na sebe. Hodnoty tvrdosti naměřené na vršených zkušebních vzorcích a na jednotlivém zkušebním vzorku stejné tloušťky se mohou lišit. [3]

Zvláště u zkušebních vzorků vstříkovaných ze semikrystalických termoplastů je v některých případech obtížné získat zkušební vzorky, která jsou přesně rovné. Při používání těchto vzorků odpovídá ve skutečnosti část měřené „hloubky vtlačení“ dráze, kterou musí urazit měřicí kulička při stlačování zkušebního vzorku na desku. Uvedenému problému se lze vyhnout použitím kruhové opěrné desky o průměru (10 ± 1) mm. Uvedený průměr desky je dostačující pro perfektně rovné zkušební vzorky. Doporučuje se rovněž, aby byl zkušební vzorek na opěrné desce umístěn svou rovnější stranou. [3]

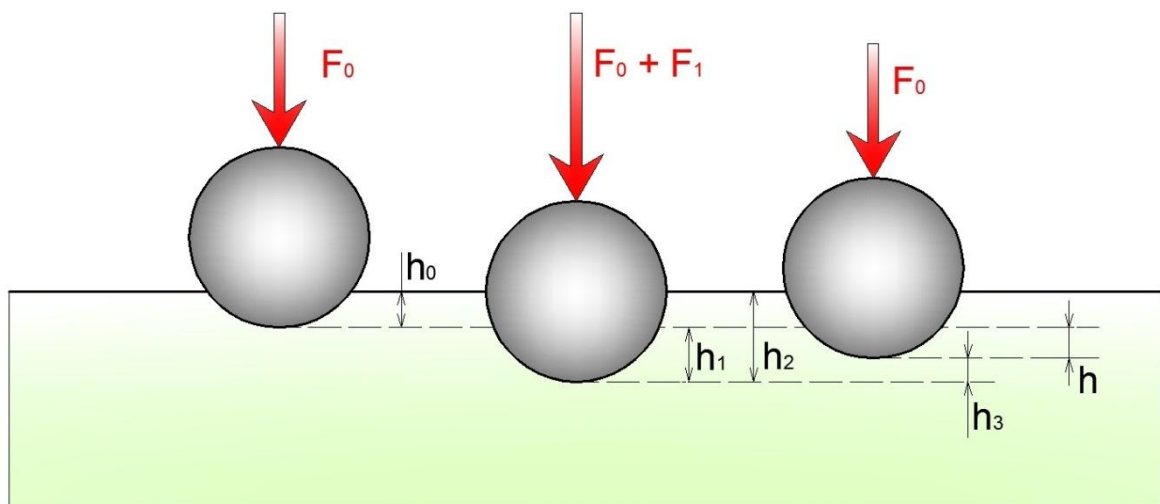
### 1.3 Tvrdost dle Rockwella

Měřítkem pro posouzení tvrdosti u této metody není plocha vtisku, nýbrž jeho hloubka. Do zkoušeného materiálu se vtlačuje ocelová kulička. Metoda je specifikovaná v normě ČSN EN ISO 2039-2 (640619): Plasty - Stanovení tvrdosti - Část 2: Tvrdost dle Rockwella. [8]

### 1.3.1 Podstata zkoušky

Metoda je založena na principu vtlačování kuličky do povrchu zkoušeného vzorku za přesně určených podmínek. Požadovaný vtisk vznikne aplikováním konstantního předběžného a následně přidavného zatížení, poté následuje návrat k témuž předběžnému zatížení. [4, 15]

Vše probíhá v předepsaných časových intervalech zatěžování. Samotné měření spočívá ve stanovení hloubky vtlačení, přičemž se odpočte elastické zotavení za určitý časový úsek po sejmutí přidavného zatížení, a také se odpočte hloubka vtlačení způsobeného předběžným zatížením. [4]



Obr. 3. Princip měření tvrdosti dle Rocwella [15]

#### Zkušební zařízení

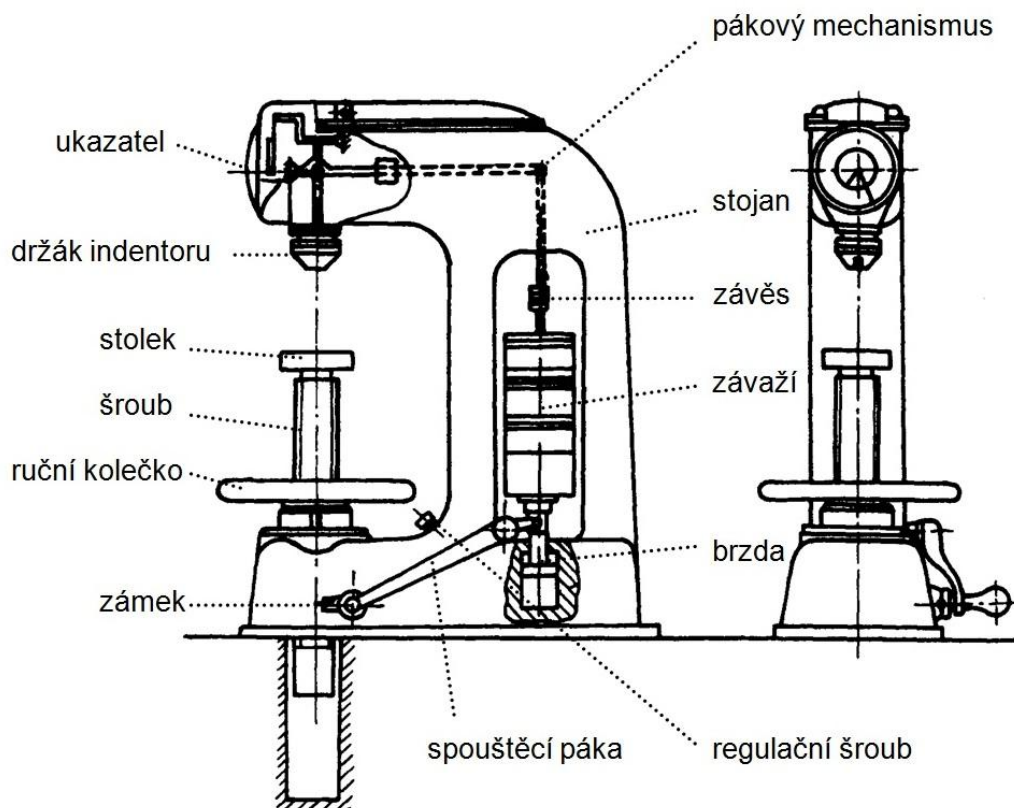
Zkušebním zařízením je standardní Rockwellův tvrdoměr, který se skládá z:

- tuhého rámu, který nese nastavitelný držák s kruhovou deskou o průměru min. 50 mm pro zkušební těleso;
- měřicí kuličky s příslušnými držáky;
- zařízení pro aplikaci různých zatížení na měřicí kuličku bez rázu. [4]

Tvrdoměr má 15 stupnic určených pro materiály různých tvrdostí. Označují se velkými písmeny. Pro plastické hmoty se používá stupnice *M*, *L* a *R*. Stupnice *E* je použita pouze pro kalibraci. Základní stupnice je *M*. Jestliže se při plném zatížení naměří více než 150

dílků, je měřený materiál příliš měkký. Místo stupnice  $M$  se použije stupnice  $L$ . Naměřili se i na stupnici  $L$  příliš velký údaj, použije se stupnice  $R$ . [8]

Měřicí kulička se nesmí během zkoušky deformovat nebo vykazovat po zkoušce poškození. Měřicí kulička je spojena s číselníkovým úchylkoměrem nebo jiným zařízením pro měření hloubky vtlačení měřicí kuličky s přesností na 0,001 mm. Je vhodné, ale ne nutné, aby byl úchylkoměr kalibrován v Rockwellově stupnici tvrdosti (1 dílek Rockwellovy stupnice = 0,002 mm). Je-li zařízení kalibrováno takto, má úchylkoměr obvykle černou a červenou stupnici, červená umožňuje automatické zařazení konstanty 130 pro odvození hodnoty tvrdosti dle Rockwella na stupnicích  $M$ ,  $L$  a  $R$ . [4]



Obr. 4. Schéma zkušebního zařízení pro měření tvrdosti dle Rockwella [15]

### 1.3.2 Postup zkoušky

Není-li uvedeno jinak, provádí se zkouška ve stejném prostředí, které se používá ke kondicionování zkušebních těles. Prostředí je specifikováno v normě ČSN EN ISO 291 (640204): Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení.

Zkušební těleso se umístí na desku. Zkontroluje se, zda povrch zkušebního tělesa a měřicí kuličky neobsahuje prach, nečistotu, mastnotu a zda je plocha zkušebního tělesa kolmá ke

směru použitého zatížení. Aplikuje se předběžné zatížení a číselníkový úchylkoměr se nastaví na nulu. Do 10 s po aplikaci předběžného zatížení se aplikuje přídavné zatížení. Přídavné zatížení se odstraní 15 s od jeho aplikace. V průběhu této operace je nutné zabránit rázu v mechanismu stroje. Proveďte se odečet na úchylkoměru na nejbližší dílek stupnice 15 s po odstranění přídavného zatížení. [4]

Na jednom povrchu zkušební tělesa se provede pět měření. Vlastní měření se nesmí provádět 10 mm od okraje zkušební tělesa ani od sebe navzájem. V ideálním případě by měly hodnoty tvrdosti dle Rockwella ležet v rozsahu 50 až 115; hodnoty, které leží nad tímto rozsahem, jsou nepřesné a stanovení je nutno opakovat s použitím přísnější stupnice. Je-li požadována přísnější stupnice než je stupnice *R*, není Rockwellova zkouška vhodná a materiál by měl být testován podle ISO 868 (tvrdost Shore). [4]

První odečet po změně nastavení kuličky se vyřadí, protože při ručním nastavení měřicí kulička nesedí řádně v upínací desce pouzdra. K usazení pouzdra měřicí kuličky do upínací desky je vyžadován plný tlak přídavného zatížení. [4]

### 1.3.3 Vyhodnocení zkoušky

Tvrdost podle Rockwella se vypočítá podle následujícího vzorce, tento vzorec platí pouze pro stupnice *M*, *L*, *R* a *E*:

$$HR = 130 - e \quad (4)$$

kde: *HR* – hodnota tvrdosti podle Rockwella

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

Před hodnotu tvrdosti dle Rockwella se uvede písmeno vyjadřující stupnici. [4]

### 1.3.4 Vnikací tělesa a zkušební zatížení

Pro měření tvrdosti dle Rockwella se využívá kuličky z leštěné tvrzené oceli. Její rozměr, předběžné a přídavné zatížení jsou shrnuty v tabulce (Tab. 2).

Tab. 2. Stupnice tvrdosti Rockwell, zatížení a průměr kuličky [4]

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

Stupnice *E* je použita pouze pro kalibraci.

### 1.3.5 Zkušební vzorky

Standardním zkušebním tělesem musí být plochá rovná deska o minimální tloušťce 6 mm. Její velikost musí splňovat požadavky, že se měření nesmí provádět 10 mm od okraje zkušebního tělesa ani od sebe navzájem. Zkušební těleso nemusí mít tvar kotouče. Po provedení zkoušky nesmí být na podložce znatelný vtisk měřicí kuličky. [4]

Pokud není možné splnit minimální tloušťku zkušebního tělesa, lze zkušební těleso složit z více tenčích zkušebních těles. Tyto tělesa musí být o stejné tloušťce a z téhož materiálu a musejí splňovat podmínku, že povrchy jednotlivých dílčích těles jsou spolu zcela v kontaktu a kontakt není narušen žádnými nedokonalostmi povrchu (např. propadlinami nebo otřepy). Všechna vtlačení musí být provedena pouze na jednom povrchu zkušebního tělesa. Pro stanovení tvrdosti dle Rockwella postačuje jedno zkušební těleso. [4]

U izotropních materiálů musí být provedeno alespoň pět měření na každém zkušebním tělese. Pokud je zkoušený materiál anizotropní, musí být specifikován směr vtlačení vzhledem k osám anizotropie. Jsou-li vyžadovány výsledky ve více než jednom směru, musí zkušební vzorek umožnit provedení alespoň pěti měření tvrdosti v každém směru. Zkušební těleso je nutno před zkouškou kondicionovat v prostředí specifikovaném v příslušné materiálové normě, nebo v jednom z prostředí uvedeném v ISO 291. [4]

### 1.3.6 Rockwell $\alpha$

Rockwellova zkouška tvrdosti podle normy ČSN EN ISO 2039-2 stanovuje tvrdost plastů jako funkci hloubky vtlačení měřicí kuličky po elastickém zotavení zkušebního tělesa. Jelikož metoda vtlačení kuličky dle ISO 2039-1 stanovuje tvrdost z hloubky vtlačení kuličky pod zatížením (tedy neumožňuje elastické zotavení materiálu), nelze s ní tvrdost dle Rockwella na stupnicích *L*, *M* a *R* porovnávat. Rockwellův tvrdoměr však lze použít i ke

stanovení tvrdosti z hloubky vtlačení pod zatížením. Tato možnost je normalizována jako Rockwellova zkouška  $\alpha$ . Jediná vhodná stupnice pro stanovení tvrdosti dle Rockwella  $\alpha$  je stupnice  $R$ , to znamená průměr měřicí kuličky 12,7 mm a přídatné zatížení 588,4 N. [4]

### Postup

Pro stanovení tuhosti pružiny zkušebního stroje se použije následující postup: měkký měděný blok (o tloušťce alespoň 6 mm) se umístí na desku a aplikuje se předběžné zatížení. Vynuluje se zařízení pro měření hloubky vtlačení a aplikuje se přídatné zatížení. Přídatné zatížení se udržuje do té doby, až je hodnota indikátoru hloubky stálá. Zaznamenaná se odečet, odstraní se přídatné zatížení a vynuluje se indikátor hloubky. Uvedený postup se opakuje do té doby, než je odečet indikátoru hloubky po každé aplikaci přídatného zatížení konstantní. Představuje to bod, kdy již nedochází k dalšímu vtlačení měděného bloku, a proto konstantní odečet hloubky znamená pohyb zařízení pro měření hloubky v důsledku pružení zkušebního zařízení. Tento konstantní odečet se zaznamená jako číslo v jednotkách 0,002 mm ( $d_s$ ). [4]

Měděný blok se nahradí zkušebním tělesem a pokračuje se stejným postupem jako u Rockwella  $L$ ,  $M$  a  $R$ . Jedinou změnou je, že po aplikaci předběžného zatížení se indikátor hloubky musí vynulovat do 10 s a okamžitě se aplikuje přídatné zatížení. Po 15 s aplikace přídatného zatížení se zaznamená hloubka vtlačení v jednotkách 0,002 mm ( $d_h$  = hloubka vtlačení v 15 s). [4]

### Vyjadřování výsledků

Tvrdość dle Rockwella  $\alpha$  se vypočte podle rovnice

$$R\alpha = 150 - (d_h - d_s) \quad (5)$$

kde:  $R\alpha$  - hodnota tvrdosti dle Rockwella  $\alpha$

$d_s$  - konstantní odečet [mm]

$d_h$  - hloubka vtlačení v 15 s [mm] [4]



### Vztah mezi tvrdostí dle Rockwella $\alpha$ a tvrdostí vtlačáním kuličky dle ISO 2039-1

Vztah v praxi platí pro reaktoplasty i termoplasty pro široký rozsah tvrdosti dle Rockwella  $\alpha$  mezi -20 a 100. Tento vztah je s dostatečnou přesností dán rovnicí: [4]

$$R\alpha = 150 - \left( \frac{448,6}{H^{0,813}} \right) \quad (6)$$

nebo

$$H = \left( \frac{448,6}{150 - R\alpha} \right)^{1,23} \quad (7)$$

kde:  $H$  - tvrdost dle ISO 2039-1

$R\alpha$  - hodnota tvrdosti dle Rockwella  $\alpha$

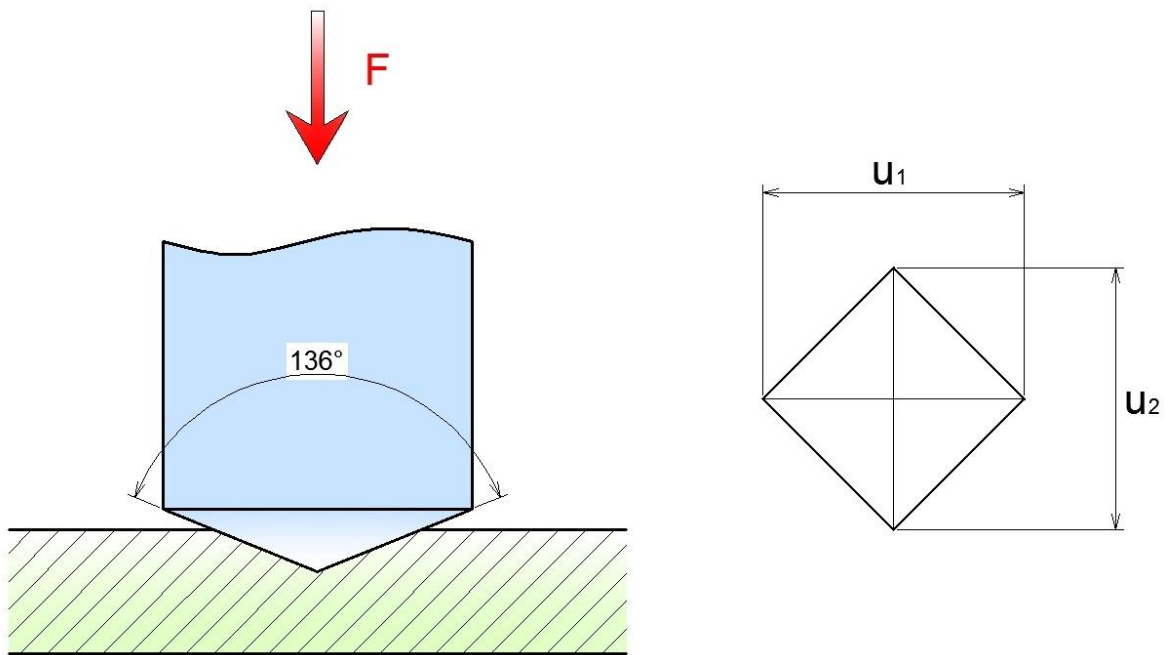
## 1.4 Tvrdost dle Vickerse

Tato zkouška byla vyvinuta v Anglii a poprvé byla popsána již v roce 1922. Pojmenována byla podle prvního tvrdoměru daného typu, který byl zkonstruován ve firmě Vickers. Je to metoda velmi přesná a citlivá, používaná hlavně v laboratořích, je rozšířena především v Evropě. [16]

Tato metoda není pro polymerní materiály specifikována v žádné normě ČSN, ISO nebo DIN.

### 1.4.1 Podstata zkoušky

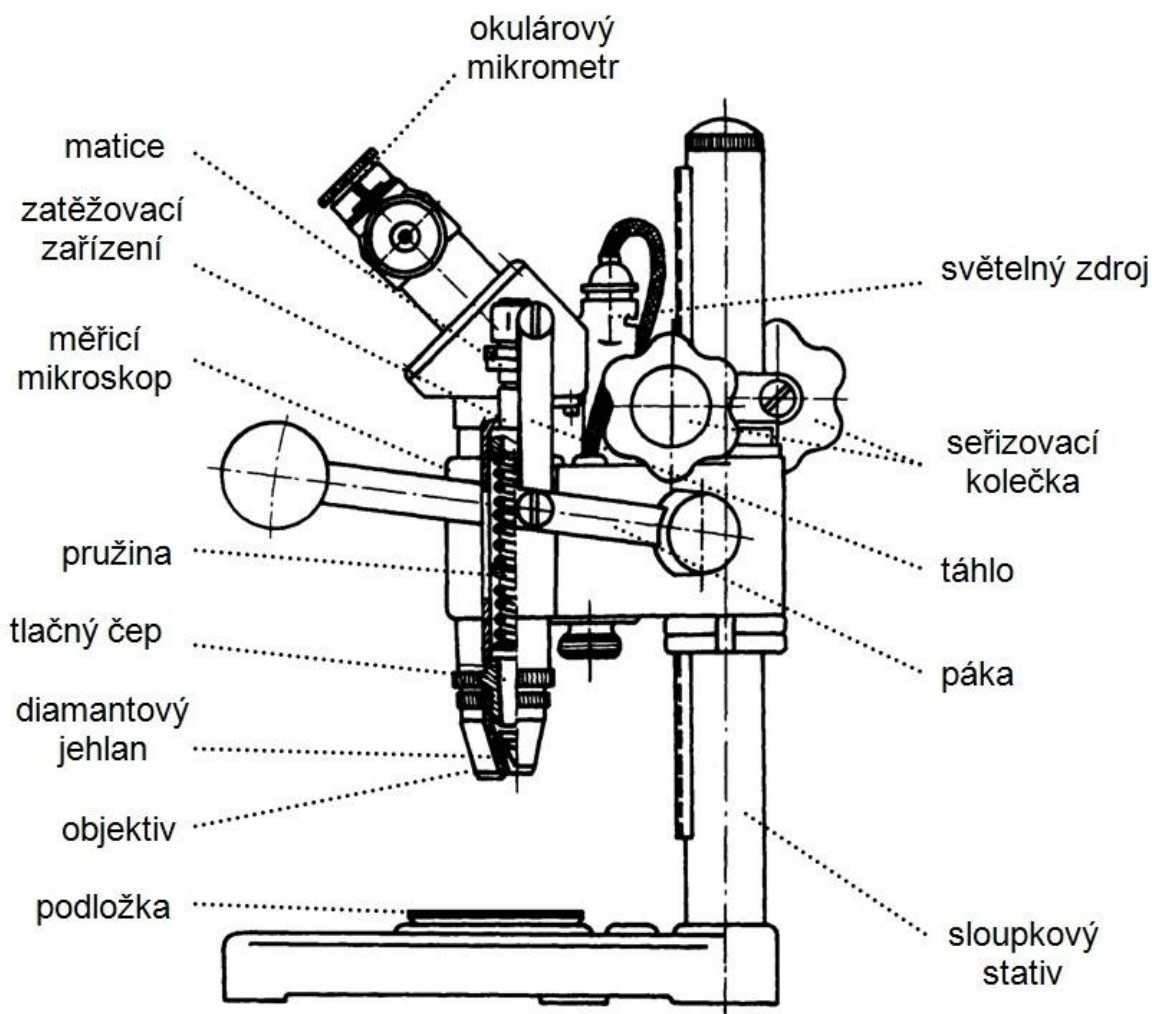
Princip Vickersovy metody je vtlačování čtyřbokého diamantového jehlanu do materiálu. Jehlan má vrcholový úhel  $136^\circ$ . Po odlehčení se měří úhlopříčka vtisku  $u$ , pomocí které lze vypočítat povrch vtisku. Vnikací těleso je do zkušební vzorku vtlačováno zkušebním zatížením  $F$  působícím v kolmém směru po stanovenou dobu. [8]



Obr. 5. Princip měření tvrdosti dle Vickerse [16]

Předností Vickersovy metody je, že lze použít různých zatížení, aniž se změní hodnoty tvrdosti. Pouze u malých zatížení jsou zjišťované hodnoty poněkud větší. [8]

Úhlopříčka se proměřuje pomocí mikroskopu a byl zkonstruován přístroj (Optidur firmy Göttfert), který používá k měření tvrdosti mikrojeřlan. Mikrojeřlan zanechává stopu o rozměrech několika  $\mu\text{m}$ . Tyto mikrotvrdoměry se používají k proměření struktury různých polymerních technických dílců, u nichž lze zkoušet jednotlivé strukturní fáze, například amorfni fázi nebo tvrdost sférolitů. V takových případech je zatížení úměrně menší a celé zařízení je zamontováno v mikroskopu, který umožňuje změřit s dostatečnou přesností rozměr úhlopříčky. [9]



Obr. 6. Schéma zkušebního zařízení pro měření tvrdosti dle Vickerse [16]

#### 1.4.2 Postup zkoušky

Zkouška probíhá obvykle při okolní teplotě v rozmezí  $10 \div 35 \text{ }^\circ\text{C}$ , v arbitrážních případech se zkouška provádí při teplotách  $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků je třeba zkoušku provádět v takovém prostředí, které udává norma ČSN EN ISO 291 Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení. [16]

Při zkoušce musí být použito některé z předepsaných zkušebních zatížení  $F$ , viz tabulka (Tab. 3). Zkušební vzorek musí být uložen na tuhé podložce a při zkoušce se nesmí hnout. Vnikací těleso je zatlačováno do zkoušeného tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu. Doba od počátku zatěžování do jeho plné hodnoty nesmí překročit 10 s. Rychlost vnikacího tělesa při vtlačování do povrchu vzorku nesmí překročit  $200 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Doba působení plného zkušebního zatížení musí být v rozmezí  $10 \div 15 \text{ s}$ . Po dobu

zkoušky musí být zkušební přístroj chráněn proti rázům a chvění, které mohou ovlivnit výsledek zkoušky. Změří se délky úhlopříček  $u_1$  a  $u_2$ . Pro stanovení tvrdosti podle Vickerse se použije aritmetický průměr  $u$  obou změřených úhlopříček. [16]

### 1.4.3 Vyhodnocení zkoušky

Tvrdot podle Vickerse  $HV$  se vyjádří poměrem zatížení  $F$  a plochy vtisku  $S$ . Plocha vtisku se získá ze vztahu:

$$S = \frac{u^2}{2 \cdot \sin \frac{136}{2}} = \frac{u^2}{1,8544} \quad (8)$$

kde:  $S$  - plocha vtisku [ $\text{mm}^2$ ]

$u$  - aritmetický průměr úhlopříček [mm] [7]

Tvrdot podle Vickerse je pak:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{1,8544 \cdot F}{u^2} \quad (9)$$

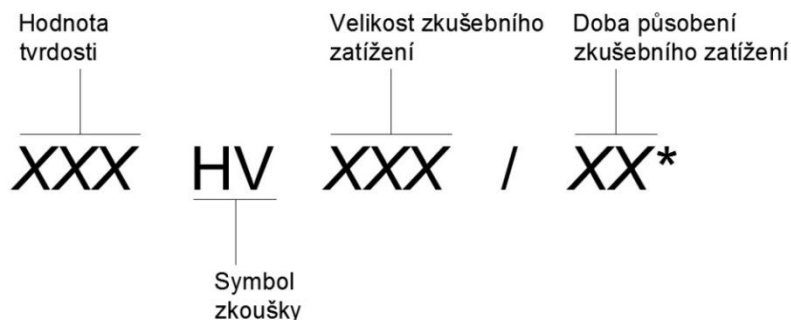
kde:  $S$  - plocha vtisku [ $\text{mm}^2$ ]

$F$  - zatěžující síla [N]

$u$  - aritmetický průměr úhlopříček [mm]

$HV$  - hodnota tvrdosti podle Vickerse [MPa] [7]

Zápis tvrdosti podle Vickerse se provádí podle schéma na obrázku (Obr. 7).



Obr. 7. Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti dle Vickerse [6]

\* - udává se tehdy, liší-li se od stanovené doby, tj. (10 až 15) s.

#### 1.4.4 Vnikací tělesa a zkušební zatížení

Pro měření tvrdosti dle Vickerse se jako vnikací těleso využívá diamantového jehlanu o vrcholovém úhlu  $136^\circ$ . Zkušební zatížení se volí podle následující tabulky (Tab. 3):

Tab. 3. Rozdělení metody Vickers [13]

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

#### 1.4.5 Zkušební vzorky

Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký, rovný a bez cizích tělísek. Povrch zkušebního vzorku musí být upraven tak, aby dovolil přesné měření rozměrů vtisku. Tloušťka zkušebního vzorku musí být nejméně 1,5 násobek délky úhlopříčky a na protilehlé straně zkušebního vzorku nesmí být po zkoušce patrné viditelné stopy deformace. Při zkouškách na zakřivených plochách se používá opravných součinitelů. [16]

## 1.5 Tvrdość Shore

Metoda Shore používá několik různých měřítek: A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO a OOO-S. Popis je zaměřen jen na typy A a D, které jsou nejčastěji používané a specifikované v normě ČSN EN ISO 868 (640624): Plasty a ebonit - Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdość Shore).

Metoda Shore se používá pro stanovení tvrdosti plastů a ebonitu vtlačováním hrotu tvrdoměru typu A (pro měkčí materiály) a typu D (pro tvrdší materiály). Metoda umožňuje měřit tvrdost na počátku vtlačování hrotu nebo po uplynutí stanovené doby, nebo obojí. Metoda je vhodná především pro účely kontroly jakosti. Při zkoušce je měřena hloubka vtlačení specifikovaného hrotu do vzorku materiálu za definovaných podmínek. Mezi tvrdostí stanovenou touto metodou a kteroukoli základní vlastností zkoušeného materiálu neexistuje žádný jednoduchý vztah. Pro účely specifikace měkčích materiálů se doporučuje použít metodu dle ISO 48 Pryž, vulkanizovaná nebo termoplastická - Stanovení tvrdosti (tvrdość v rozmezí 10 až 100 IRHD). [2]

### 1.5.1 Podstata zkoušky

Postatou zkoušky je měření odporu proti vtlačování hrotu předepsaného tvaru do zkoušeného materiálu. Hodnota tvrdosti je nepřímou úměrná hloubce vtlačení hrotu, dále závisí na modulu pružnosti a na viskoelastických vlastnostech materiálu. [2]

Tvrdoměry jsou založeny na zatěžování pomocí pružin, které je nutné před měřením kontrolovat a cejchovat. [7]

Tvrdoměry Shore A mohou být použity pro měkké elastomery a velmi měkké termoplasty. Tvrdoměry Shore D mohou být použity pro tvrdé elastomery a měkké termoplasty. Hodnoty tvrdosti jsou v rozsahu od 0 (pro plné vtlačení) do 100 (bez vtlačení). Plné vtlačení je mezi 2,46 a 2,54 mm v závislosti na použitém vybavení. [2]

### 1.5.2 Postup zkoušky

Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků je třeba zkoušku provádět v takovém prostředí, které udává norma ČSN EN ISO 291 Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení.

Zkušební vzorek se umístí na rovný tvrdý vodorovný povrch. Tvrdoměr se přikládá ve směru kolmém na zkušební vzorek tak, aby vzdálenost mezi špičkou zkušebního hrotu a okrajem zkušebního vzorku byla nejméně 9 mm. [2]

Opěrná patka se rychle a bez nárazu přitlačí ke zkušebnímu vzorku, rovnoběžnost s povrchem zkušebního vzorku musí být zachována. Tlak se volí tak, aby došlo k pevnému kontaktu mezi zkušebním tělesem a opěrnou patkou. Tvrdost se odečte na stupnici přístroje po uplynutí určeného časového úseku. Počáteční hodnota tvrdosti se odečítá do 1 sekundy od docílení pevného kontaktu mezi zkušebním vzorkem a opěrnou patkou. Pokud je tvrdoměr vybaven ukazatelem maximální hodnoty, tak se odečte i maximální hodnota. Měření se provádí pětkrát na různých místech vzorku vzdálených od sebe nejméně 6 mm, poté se vypočítá aritmetický průměr. [2]

Použití tvrdoměru Shore D se doporučuje, pokud jsou výsledky z měření tvrdoměrem Shore A vyšší než 90. Použití tvrdoměru Shore A se doporučuje, pokud jsou výsledky z měření tvrdoměrem Shore D nižší než 20. Hodnoty nižší než 10 nejsou u tvrdoměru Shore A přesné a neuvádí se, pro měření v této oblasti lze však využít jiných metod např. IRHD. [2]

### 1.5.3 Vyhodnocení zkoušky

Tvrdost se odečte na stupnici přístroje po uplynutí určené doby.

#### Zápis hodnot

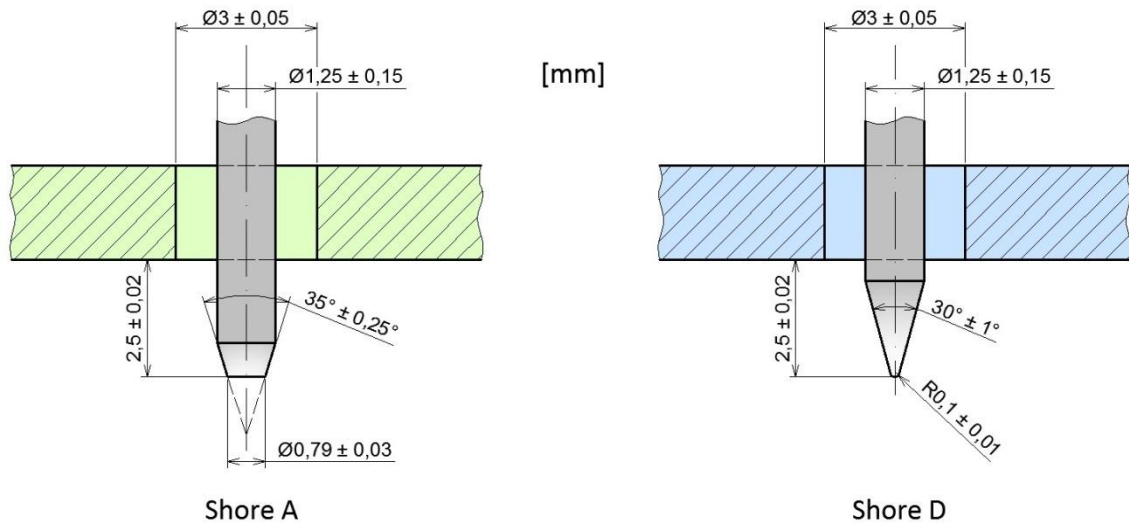
Výsledek měření se uvede např. v tomto tvaru: tvrdost HShD / 15:70 – kde D je typ tvrdoměru, 15 je doba měření v sekundách a 70 je hodnota tvrdosti.

### 1.5.4 Vnikací tělesa a zkušební zatížení

Pro metodu Shore se využívá vtlačování hrotů různých tvarů, viz obrázek (Obr. 8).

U tvrdoměru Shore A je vnikacím tělesem ocelový kalený a vyleštěný válcový čep o průměru 1,25 mm, zakončený komolým kuželem o vrcholovém úhlu 35° a s průměrem otupené části 0,79 mm. Zatížení na ocelový čep je provedeno pružinou, která musí vyvozovat sílu 0,549 N při 0,0 HShA a 8,06 N při 100 HShA. [5]

U tvrdoměru Shore D je vnikacím tělesem ocelový kalený a vyleštěný válcový čep o průměru 1,25 mm, zakončený kuželem o vrcholovém úhlu 30°, vrchol kuželu není ostrý, ale je zde vytvořen rádius 0,1 mm. Zatížení na ocelový čep je provedeno pružinou, která musí vyvozovat sílu 8,9 N při 20 HShD a 44,5 N při 100 HShD.



Obr. 8. Princip měření tvrdosti Shore [2]

### 1.5.5 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky musí být hladké, rovné a bez viditelných defektů. [7]

Norma povoluje zkušební tělesa o minimální tloušťce 4 mm. Vzdálenost od okrajů zkušebního tělesa musí být 9 mm. Lze použít vrstvená tělesa. [2]

## 1.6 Metoda IRHD

IRHD = International Rubber Hardness Degree = Mezinárodní stupeň tvrdosti pryže

Metoda je specifikovaná v normě ČSN ISO 48 (621433): Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer - Stanovení tvrdosti (tvrdost mezi 10 IRHD a 100 IRHD).

Zkouška tvrdosti specifikovaná v této normě je určena k rychlému změření tuhosti pryže na rozdíl od zkoušek tvrdosti jiných materiálů, u kterých se měří odolnost za trvalé deformace. [1]

Tvrdost je vyjádřena v mezinárodních stupních tvrdosti (IRHD). Metoda pokrývá rozsah tvrdosti od 10 IRHD do 100 IRHD. Metody se odlišují průměrem vlačovací kuličky a velikostí vlačovací síly, výběr metody je dán možností jejího použití v dané aplikaci. Norma uvádí i rozsah použitelnosti jednotlivých metod. [1]

Stanovení tvrdosti kapesním tvrdoměrem uvádí norma ČSN ISO 7619-2 (621432): Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer - Stanovení tvrdosti vlačováním - Část 2: Metoda měření kapesním tvrdoměrem IRHD.



### 1.6.1 Podstata zkoušky

Tvrдост je měřena z hloubky vtlačení sférického indentoru, pod specifikovanou silou, v pryžovém zkušebním tělese. [1]

Zatížení je vyvozováno závažím a celá konstrukce tvrdoměru je uzpůsobena tak, aby se výsledky měření co nejméně lišily od tvrdostní škály Shore A. Proměnná je hloubka vniku kuličky do zkoušeného materiálu měřená výškovým indikátorem. [9]

Norma popisuje čtyři metody pro stanovení tvrdosti vulkanizovaných nebo termoplastických pryží s plochými povrchy (standardní metody měření tvrdosti) a čtyři metody pro stanovení zdánlivé tvrdosti zakřivených povrchů (metody měření zdánlivé tvrdosti). [1]

#### Standardní metody měření tvrdosti

Metoda N: Normální zkouška - Tato metoda je vhodná pro pryže o tvrdosti v rozsahu 35 IRHD až 85 IRHD, ale připouští se použití v rozsahu tvrdosti 30 IRHD až 95 IRHD.

Metoda H: Zkouška pro vysoké tvrdosti - Tato metoda je vhodná pro pryže o tvrdosti v rozsahu 85 IRHD až 100 IRHD.

Metoda L: Zkouška pro nízké tvrdosti - Tato metoda je vhodná pro pryže o tvrdosti v rozsahu 10 IRHD až 35 IRHD.

Metoda M: Mikrozkouška - Tato metoda je v podstatě zmenšenou verzí normální zkušební metody N, umožňující zkoušení tenkých a malých zkušebních těles. Je zkušební metodou vhodnou pro pryže o tvrdosti v rozsahu 35 IRHD až 85 IRHD, ale připouští se také použití v rozsahu 30 IRHD až 95 IRHD. [1]

Hodnoty tvrdosti získané metodou N v rozmezích od 85 IRHD do 95 IRHD a od 30 IRHD do 35 IRHD nemusí být přesně shodné s hodnotami stanovenými metodou H nebo metodou L, podle uvedeného pořadí. Rozdíly nemají pro technické účely praktický význam. [1]

Pro různé povrchové vlivy u pryže a drobné povrchové nerovnosti (vzniklé např. broušením) mikrozkouška neposkytne vždy výsledky souhlasné s výsledky získanými normální zkouškou. [1]

#### Metody měření zdánlivé tvrdosti

Pro zkoušky zdánlivé tvrdosti na zakřivených površích jsou specifikovány čtyři metody, CN, CH, CL a CM. Tyto metody jsou modifikacemi metod N, H, L a M, podle uvedeného

pořadí, pro případy, kdy je zkoušený povrch pryže zakřivený. Existují dva důvody pro jejich použití závislé na tom, zda

- a) zkušební těleso nebo výrobek je dost velký na to, aby byl na něj postaven tvrdoměr;
- b) zkušební těleso je dost malé na to, aby bylo spolu s přístrojem umístěno na společném stojanu.

Při variantě b) je zkušební těleso umístěno na měřicím stolku přístroje. [1]

Zdánlivá tvrdost se může také měřit na nestandardních rovných zkušebních tělesech za použití metod N, H, L a M. [1]

Popsané postupy nemohou postihnout všechny možné tvary a rozměry zkušebního tělesa, ale pokrývají některé nejběžnější typy, jako jsou „O“ kroužky. [1]

### 1.6.2 Postup zkoušky

Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků je třeba zkoušku provádět v takovém prostředí, které udává norma ČSN EN ISO 291 Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení.

Zkušební těleso se přítlačnou patkou přitlačí k podložce přístroje, uvolní se výškový indikátor a po dobu 5 sekund se nechá působit přítlačná síla (předtížení). Je-li indikátor se stupnicí přímo v jednotkách IRHD, pak musí být ručička po působení předtížení nastavena na hodnotu 100. Síla se zvýší na hodnotu celkového zatížení a po 30 sekundách se odečte příslušný údaj na stupnici. Je-li výškový indikátor se stupnicí v metrických jednotkách délky (0,01 mm), pak se pro předtížení před vlastním měřením nastaví stupnice na 0. Měření se provede na třech různých místech zkušebního vzorku. [9]

Jedna IRHD jednotka tvrdosti odpovídá přibližně stejnému rozdílu v modulu pružnosti, u pryží s vysokou elasticitou odpovídají přibližně i stupňům Shore A. Nejnižší stupeň tvrdosti představuje pryž s nulovým modulem pružnosti, nejvyšší 100 pak tvrdost s nekonečným modulem pružnosti. [9]

Pro vztah mezi modulem pružnosti  $E$  a hloubkou vtlačení indentoru  $h$  platí rovnice:

$$\frac{F}{E} = 0,0038 \cdot r^{0,65} \cdot h^{1,35} \quad (10)$$

kde:  $F$  – síla [N]

$E$  – modul pružnosti [MPa]

$r$  – poloměr kuličky (indentoru) [mm]

$h$  – hloubka vtlačení [mm] [9]

### 1.6.3 Vyhodnocení zkoušky

Je-li indikátor se stupnicí v jednotkách IRHD odečte se příslušný údaj přímo na stupnici. Je-li výškový indikátor se stupnicí v metrických jednotkách délky (0,01 mm), pak se tvrdost odečte z převodních tabulek podle naměřené hloubky vtlačení.

#### Zápis hodnoty tvrdosti

Tvrdost se vyjadřuje jako střední hodnota jednotlivých měření. Hodnota se zaokrouhlí na nejbližší celé číslo v mezinárodních stupnicích tvrdosti pryže a označí se symbolem °. [1]

Například:

90°, H – střední hodnota 90, provedena na tělesa standardních rozměrů metodou H pro vysoké tvrdosti,

50°, CN – střední hodnota 50, zkouška provedena na zakřiveném povrchu metodou N pro normální zkoušku.

### 1.6.4 Vnikací tělesa a zkušební zatížení

Pro měření tvrdosti metodou IRHD se využívá kuličky. Její rozměry a použitá zatížení uvádí následující tabulka (Tab. 4).

Tab. 4. Rozměry zkušebního zařízení a velikost sil pro jednotlivé metody IRHD [1]

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

### 1.6.5 Zkušební vzorky

Pro všechny metody platí, že u zkušebních vzorků musí být horní a spodní povrchy ploché, hladké a vzájemně paralelní. Zkušební vzorky pro srovnávání tvrdosti musí mít stejnou tloušťku. [1]

#### Metoda N a H

Tloušťka zkušebního vzorku musí být v rozmezí 8 až 10 mm. Této tloušťky se dosáhne vrstvením pryže, tloušťka jednotlivé vrstvy nesmí být nižší než 2 mm. U nestandardních vzorků může být tloušťka menší nebo větší, nesmí však klesnout pod 4 mm. Předepsanou minimální vzdálenost bodu měření od okraje zkušebního tělesa uvádí tabulka (Tab. 5). [1]

#### Metoda L

Tloušťka zkušebního vzorku musí být v rozmezí 10 až 15 mm. Této tloušťky se dosáhne vrstvením pryže, tloušťka jednotlivé vrstvy nesmí být nižší než 2 mm. U nestandardních vzorků může být tloušťka menší nebo větší, nesmí však klesnout pod 6 mm. Minimální vzdálenost bodu měření od okraje zkušebního tělesa uvádí tabulka (Tab. 5). [1]

## Metoda M

Tloušťka zkušební vzorku musí být  $(2 \pm 0,5)$  mm. U nestandardních vzorků může být tloušťka menší nebo větší, nesmí však klesnout pod 1 mm. Bod měření musí být nejméně 2 mm od okraje zkušební vzorku. [1]

Tab. 5. Min. vzdálenost bodu měření od okrajů zk. vzorku pro metody N, H a L [1]

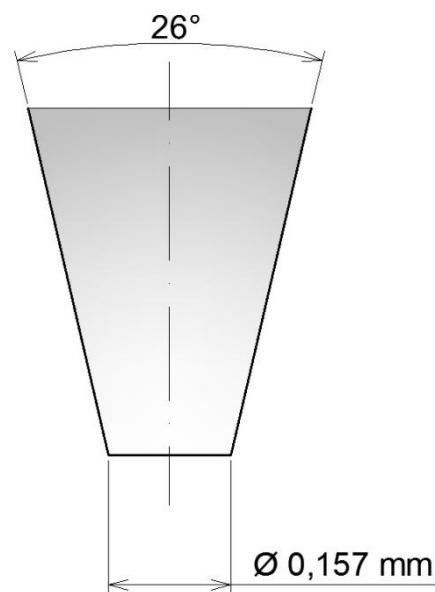
<b>Tloušťka zkušební vzorku [mm]</b>	4	6	8	10	15	25
<b>Min. vzdálenost bodu měření od okrajů zkušební vzorku [mm]</b>	7	8	9	10	11,5	13

## 1.7 Ostatní metody

### 1.7.1 Tvrdoměr Barcol

Tvrdoměr Barcol se nejčastěji využívá jako přenosný tvrdoměr pro kontrolu výrobků a zkušebních vzorků pro účely řízení výroby.

Metoda je specifikovaná v normě ČSN EN 59 (644009): Sklem vyztužené plasty - Stanovení tvrdosti pomocí tvrdoměru Barcol a ASTM D2583: Standardní zkušební metoda pro měření tvrdosti vtiskem tuhých plastů pomocí tvrdoměru Barcol.



Obr. 9. Tvar indentoru tvrdoměru Barcol [12]

Tvrdoměr je vhodný pro měření vyztužených i nevyztužených polymerních materiálů a dalších materiálů. Tvrdost je mírou odporu materiálu proti pronikání ocelového indentoru, který je připojený přes pružinu. Hodnoty tvrdosti se odečítají na analogovém ciferníku, hodnoty jsou v rozsahu 0 až 100. Existují i digitální přístroje. [10, 11]

Tvrdoměr Barcol je dostupný ve třech verzích lišících se dle použití, rozdělení je naznačeno v tabulce (Tab. 6).

Tab. 6. Rozdělení tvrdoměrů Barcol

Model	Použití	Orientační rozmezí
934-1	Měkké kovy, jako je hliník, měď a mosaz. Některé tvrdé plasty a sklolaminát.	25 - 150 Brinell (pro kuličku o prům. 10 mm a zatížení 500 kg)
935	Plasty a velmi měkké materiály.	50 - 110 Rockwell R
936	Extremně měkké materiály a látky např. kůže, linoleum.	-

Pro model 934-1 jsou běžně nabízeny srovnávací tabulky Brinell, Vickers a Rockwell B, E, F a H. Pro modely 935 a 936 se žádné srovnávací tabulky nenabízí. [11]



Obr. 10. Tvrdoměr Barcol [11]

Tvrdoměr Barcol se nejlépe hodí pro testování homogenních materiálů. Při měření materiálů zrnitých, vláknitých a s hrubou strukturou metoda neposkytuje jednoznačně výsledky

z důvodu malého průměru vnikacího tělesa. Doporučuje se, aby byl zkoušený materiál alespoň 0,8 mm tlustý, a minimální vzdálenost místa vniku musí být od všech okrajů alespoň 3,175 mm. Tvrdoměr se ke zkoušenému materiálu přikládá kolmo. [11]

### 1.7.2 Mikrotvrdost

V některých případech nejsou plasty homogenní, obsahující amorfní fáze na jedné straně a sférolity na druhé straně. V tomto případě pak tvrdost stanovená běžnými metodami není vyjádřena správně, poněvadž plocha po vniklém elementu zasahuje oblast dvou fází. Proto je výhodné použít metodu pomocí mikrotvrdoměru. Je to v podstatě přístroj podobný přístroji pro Vickersovu zkoušku, avšak vnikací element (jehlan) je tak malý, že zanechává stopu jen o rozměrech několika  $\mu\text{m}$ . Zatížení se používá rovněž nižší (jen několik gramů). Celé zařízení je obvykle zamontováno v mikroskopu, kterým se měří s dostatečnou přesností délka úhlopříčky. [7]

Povrch zkušební vzorku pro tuto zkoušku musí být dokonale obroušen a vyleštěn. U většiny plastických hmot nelze dosáhnout vhodného povrchu pro tuto zkoušku, proto se také málo využívá. [8]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



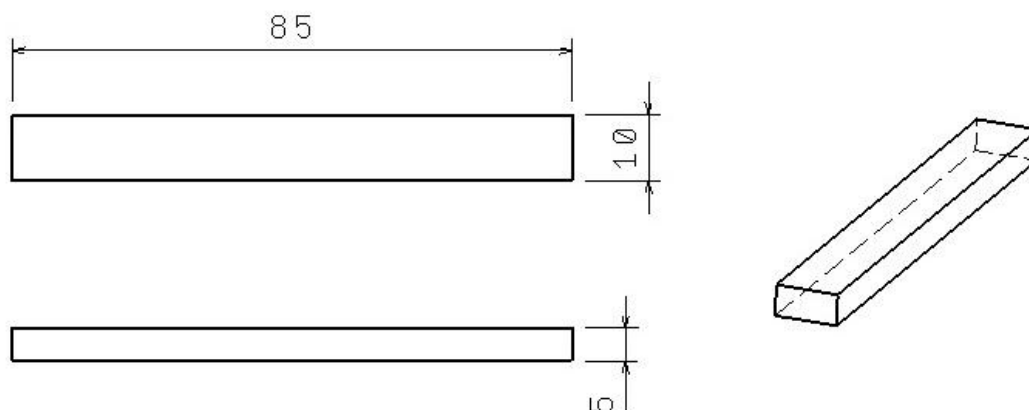
## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 2.1 Cíl práce

Experimentální část této bakalářské práce se zabývá měřením tvrdosti vybraných polymerních materiálů. Měření probíhalo v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství Fakulty technologické ve Zlíně.

### 2.2 Zkušební vzorky a použité metody

K měření bylo vybráno 20 různých zkušebních vzorků, viz tabulka (Tab. 8). Na každém vzorku bylo provedeno 30 měření. Tvar a rozměry zkušebních vzorků jsou uvedeny na obrázku (Obr. 11).



Obr. 11. Tvar a rozměry zkušebních vzorků

Pro měření byly vybrány 4 metody. Přehled těchto metod včetně jejich normy ukazuje tabulka (Tab. 7).

Tab. 7. Použité metody

Poř. č.	Název	Norma
1	Tvrdomost SHORE A	ČSN EN ISO 868
2	Tvrdomost SHORE D	ČSN EN ISO 868
3	Metoda vtlačení kuličky BIM H5/132	ČSN EN ISO 2039-1
4	Metoda vtlačení kuličky BIM H5/358	ČSN EN ISO 2039-1

Tab. 8. Přehled vybraných vzorků pro praktickou část

Vzorek	Popis
PP-2300-30 kGy	Polypropylen 2300 s různou dávkou ozáření elektronovým beta zářením v jednotkách kGy.
PP-2300-45 kGy	
PP-2300-60 kGy	
PP-2300-90 kGy	
PP-256F-45 kGy	Polypropylen 256F s různou dávkou ozáření elektronovým beta zářením v jednotkách kGy.
PP-256F-60 kGy	
PP-256F-90 kGy	
PP-neplněný	Neplněný polypropylen.
PP-plněný 25%	Polypropylen plněný z 25 % skelnými vlákny.
PP-50-20°	Polypropylen 50 vystavený různým teplotám.
PP-50-60°	
PP-50-100°	
PE-DOW-20°	Polyethylen DOW vystavený různým teplotám.
PE-DOW-60°	
PE-DOW-100°	
PBT-neozař.	Neozářený Polybutylentereftalát.
Polystyren	Polystyren.
PA 6-neplněný	Neplněný Polyamid 6.
TPE	Termoplastický elastomer.
HDPE	Vysokohustotní polyethylen.

### 2.3 Postup měření

Měření metodou SHORE A a SHORE D bylo provedeno na tvrdoměru OMAG AFFRI ART 13 s příslušnou digitální sondou. Sonda byla opatřena ocelovým kaleným hrotem, více viz kapitola 1.5.4 a obrázek (Obr. 8). Zkušební vzorek se umístil na rovný tvrdý vodorovný povrch, který byl v našem případě součástí stojánku tvrdoměru. Tvrdoměr se přiložil ve směru kolmém na zkušební vzorek. Poté se rychle a bez nárazu na dobu 5 s přitlačil zkušební vzorek k tvrdoměru tak, aby bylo docíleno pevného kontaktu. Po odlehčení byla okamžitě odečtena hodnota tvrdosti z displeje přístroje.

Pro měření pomocí metody vtlačení kuličky (BIM) byl použit univerzální tvrdoměr OMAG AFFRI INTEGRAL 2E. Vnikacím tělesem v tomto případě byla kulička vyrobená z leštěné tvrzené oceli o průměru  $(5,00 \pm 0,05)$  mm. Zkušební vzorek se umístil na opěrnou desku tak, aby na ní spočíval celým svým povrchem a aby jeho plochy byly kolmé ke směru působení zátěže. Nejprve se nechalo působit počáteční zatížení  $F_0 = 9,8 \pm 0,1$  N a poté se zvolna bez rázu aplikovalo zkušební zatížení  $F_m$  po dobu 2 až 3 sekund. Pro měření bylo vybrána zkušební zatížení  $F_m$  o hodnotě 132 N a 358 N. Po uplynutí 30 s působení zkušebního zatížení  $F_m$  se z displeje tvrdoměru odečetla tvrdost a hloubka vtlačení.

## 2.4 Zpracování výsledků

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

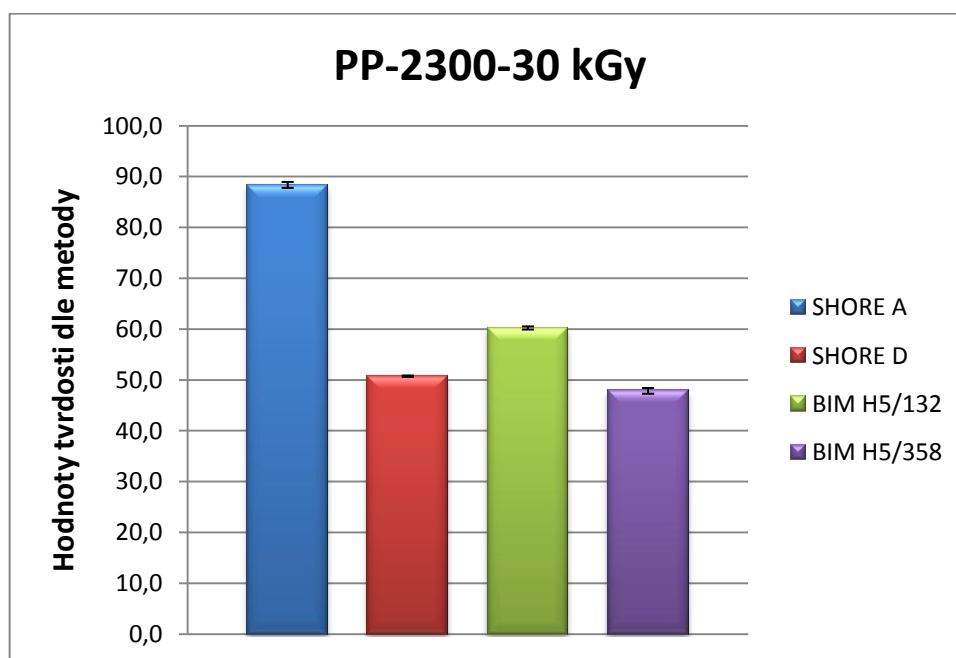
Střední kvadratická chyba aritmetického průměru:

$$\delta = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

## 2.4.1 PP-2300-30 kGy

Tab. 9. Výsledky měření pro PP-2300-30 kGy

PP-2300-30 kGy				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
x	88,4	50,8	60,24	47,86
s	3,2	0,8	1,68	3,09
$\delta$	0,6	0,1	0,31	0,56



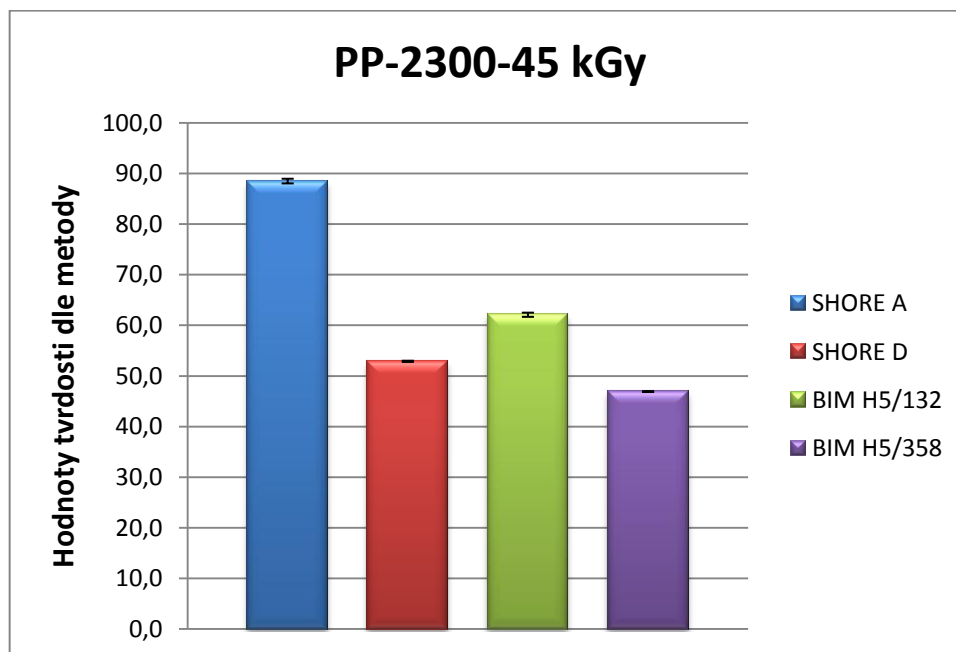
Obr. 12. Tvrdost PP-2300-30 kGy dle jednotlivých metod

Nejvyšší hodnota tvrdosti materiálu PP-2300-30 kGy, konkrétně 88,4 HShA, byla naměřena pomocí metody SHORE A. Naproti tomu nejnižší hodnota tvrdosti 47,86 HB byla zjištěna metodou BIM H5/358, viz tabulka (Tab. 9) a obrázek (Obr. 12).

## 2.4.2 PP-2300-45 kGy

Tab. 10. Výsledky měření pro PP-2300-45 kGy

PP-2300-45 kGy				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
x	88,5	52,9	62,10	46,93
s	2,5	0,7	2,27	0,51
$\delta$	0,5	0,1	0,41	0,09



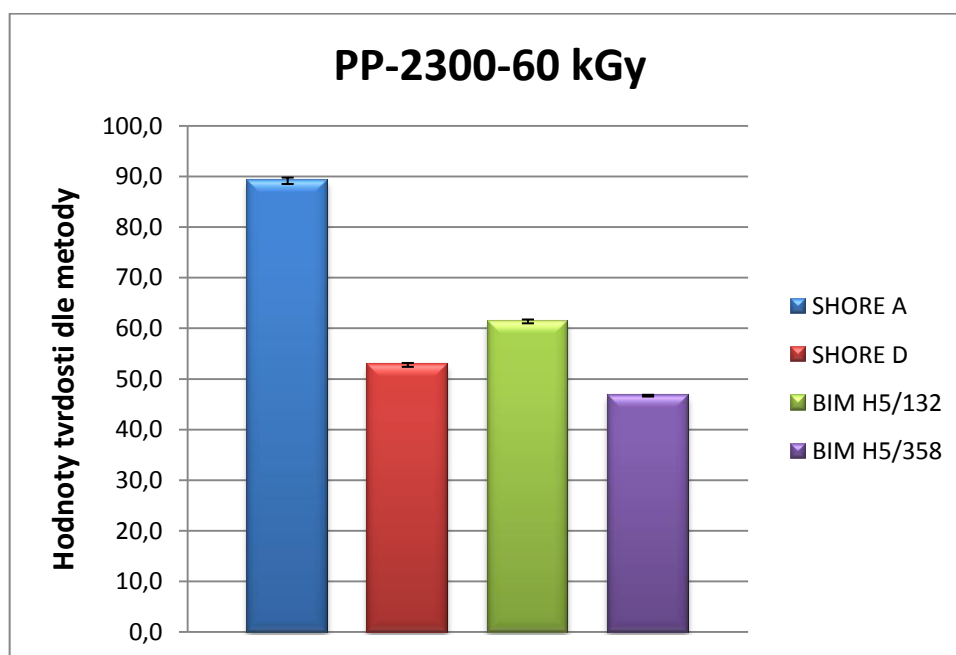
Obr. 13. Tvrdost PP-2300-45 kGy dle jednotlivých metod

U materiálu PP-2300-45 kGy byla nejnižší hodnota tvrdosti 46,93 HB zjištěna metodou BIM H5/358. Nejvyšší hodnota tvrdosti, konkrétně 88,5 HShA, byla naměřena pomocí metody SHORE A, viz tabulka (Tab. 10) a obrázek (Obr. 13).

## 2.4.3 PP-2300-60 kGy

Tab. 11. Výsledky měření pro PP-2300-60 kGy

PP-2300-60 kGy				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
x	89,2	52,8	61,38	46,71
s	3,4	2,1	2,06	0,93
$\delta$	0,6	0,4	0,38	0,17



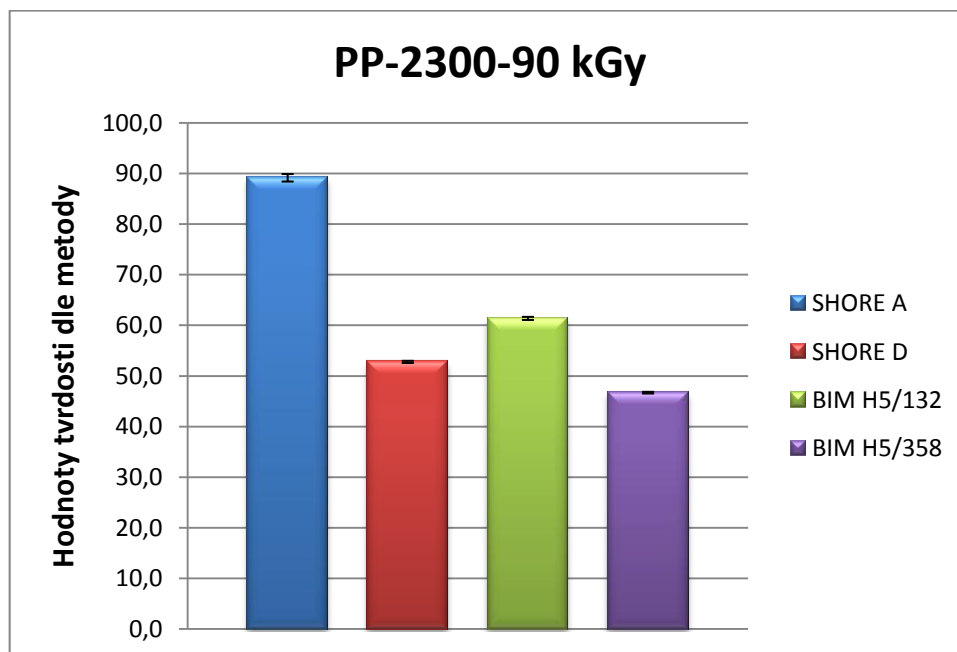
Obr. 14. Tvrdost PP-2300-60 kGy dle jednotlivých metod

Při měření materiálu PP-2300-60 kGy byla zjištěna nejvyšší hodnota tvrdosti metodou SHORE A, konkrétně 89,2 HShA. Na druhou stranu nejnižší hodnota tvrdosti 46,71 HB byla naměřena pomocí metody BIM H5/358, viz tabulka (Tab. 11) a obrázek (Obr. 14).

## 2.4.4 PP-2300-90 kGy

Tab. 12. Výsledky měření pro PP-2300-90 kGy

PP-2300-90 kGy				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	88,3	53,6	66,01	48,63
<b>s</b>	4,1	1,2	1,69	0,91
<b>δ</b>	0,7	0,2	0,31	0,17



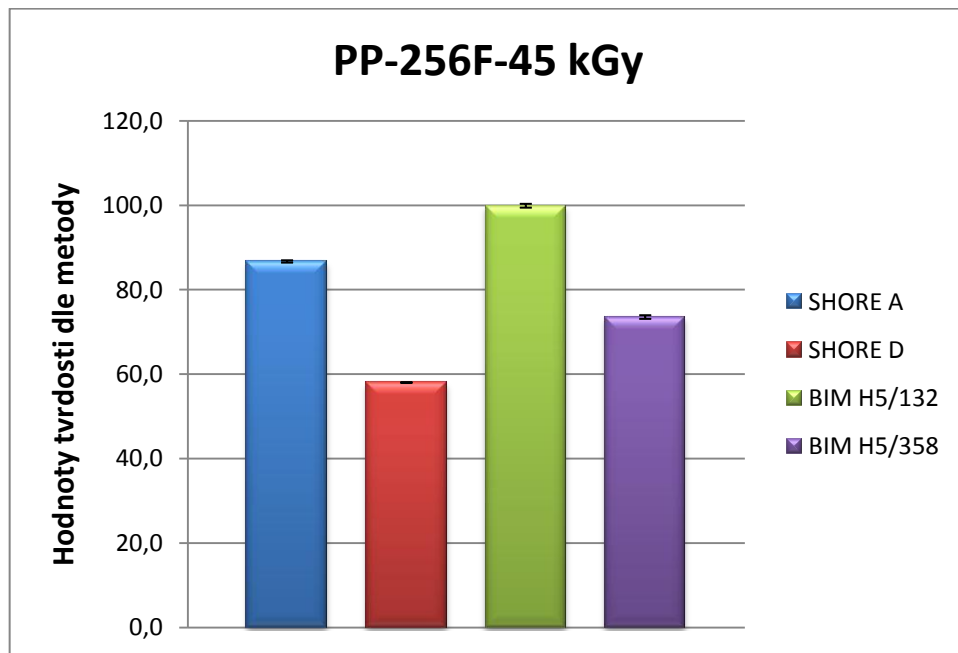
Obr. 15. Tvrdost PP-2300-90 kGy dle jednotlivých metod

Z výsledků měření tvrdosti materiálu PP-2300-90 kGy je patrné, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna metodou SHORE A, konkrétně 88,3 HShA. Zatímco nejnižší hodnota tvrdosti 48,63 HB byla naměřena pomocí metody BIM H5/358, viz tabulka (Tab. 12) a obrázek (Obr. 15).

## 2.4.5 PP-256F-45 kGy

Tab. 13. Výsledky měření pro PP-256F-45 kGy

PP-256F-45 kGy				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	86,7	58,0	99,90	73,54
<b>s</b>	1,5	0,6	2,48	2,37
<b>δ</b>	0,3	0,1	0,45	0,43



Obr. 16. Tvrdost PP-256F-45 kGy dle jednotlivých metod

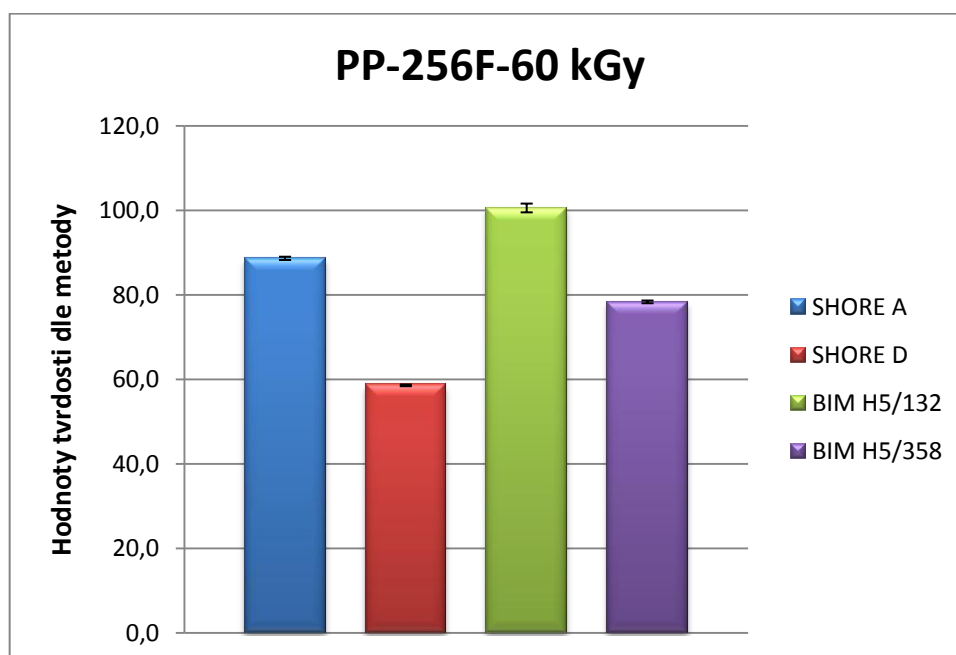
U materiálu PP-256F-45 kGy byla nejnižší hodnota tvrdosti 58,0 HShD zjištěna metodou SHORE D. Nejvyšší hodnota tvrdosti, konkrétně 99,90 HB, byla naměřena pomocí metody BIM H5/132, viz tabulka (Tab. 13) a obrázek (Obr. 16).



## 2.4.6 PP-256F-60 kGy

Tab. 14. Výsledky měření pro PP-256F-60 kGy

PP-256F-60 kGy				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	88,7	58,6	100,57	78,35
<b>s</b>	2,1	1,1	5,68	1,79
<b>δ</b>	0,4	0,2	1,04	0,33



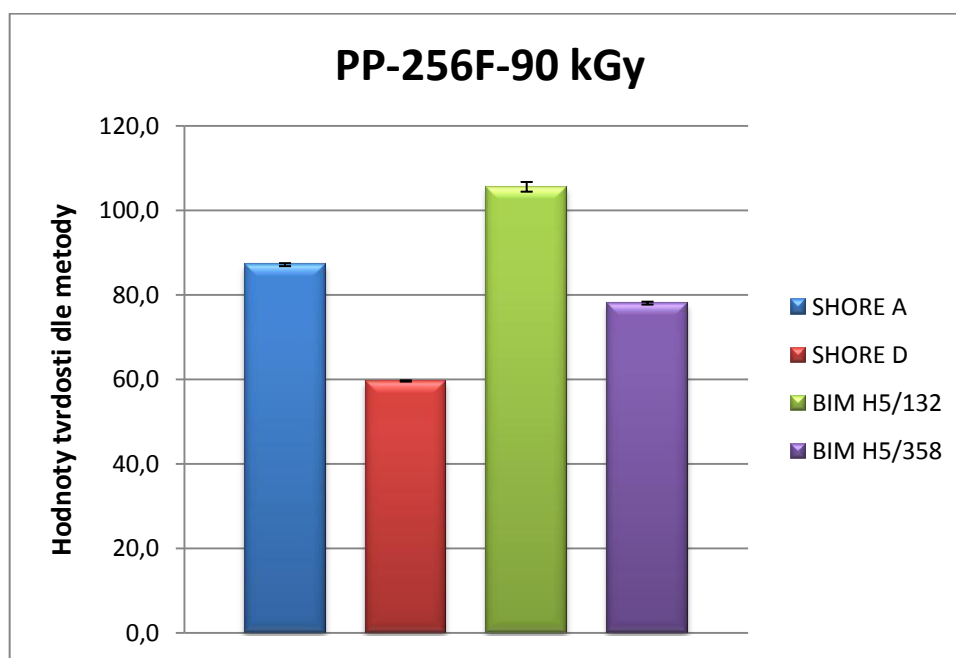
Obr. 17. Tvrdost PP-256F-60 kGy dle jednotlivých metod

Nejvyšší hodnota tvrdosti materiálu PP-256F-60 kGy, konkrétně 100,57 HB, byla naměřena pomocí metody BIM H5/132. Naproti tomu nejnižší hodnota tvrdosti 58,6 HShD byla zjištěna metodou SHORE D, viz tabulka (Tab. 14) a obrázek (Obr. 17).

## 2.4.7 PP-256F-90 kGy

Tab. 15. Výsledky měření pro PP-256F-90 kGy

PP-256F-90 kGy				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	87,2	59,6	105,57	78,05
<b>s</b>	1,9	0,8	6,30	1,89
<b>δ</b>	0,4	0,1	1,15	0,34



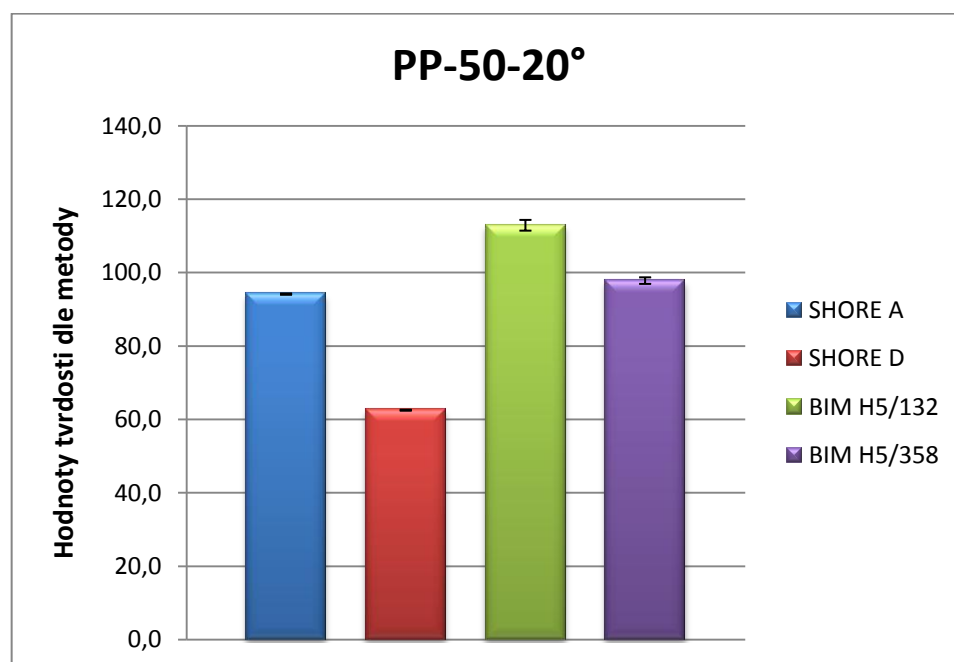
Obr. 18. Tvrdość PP-256F-90 kGy dle jednotlivých metod

Z výsledků měření tvrdosti materiálu PP-256F-90 kGy je patrné, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna metodou BIM H5/132, konkrétně 105,57 HB. Zatímco nejnižší hodnota tvrdosti 59,6 HShD byla naměřena pomocí metody SHORE D, viz tabulka (Tab. 15) a obrázek (Obr. 18).

## 2.4.8 PP-50-20°

Tab. 16. Výsledky měření pro PP-50-20°

PP-50-20°				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
x	94,2	62,5	112,91	97,84
s	1,0	0,8	8,03	4,90
δ	0,2	0,1	1,47	0,90



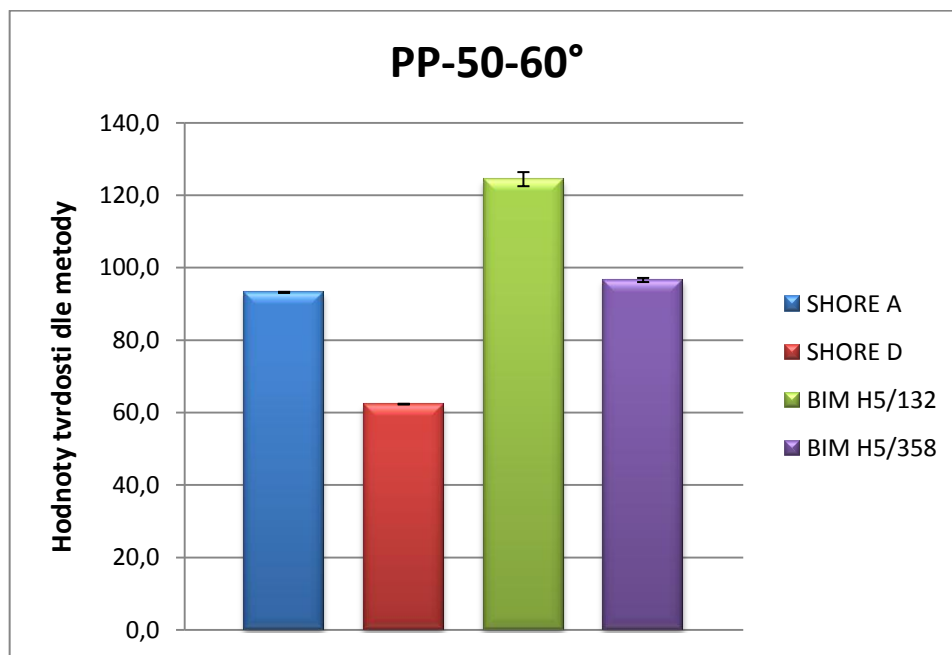
Obr. 19. Tvrdost PP-50-20° dle jednotlivých metod

Při měření materiálu PP-50-20° byla zjištěna nejvyšší hodnota tvrdosti metodou BIM H5/132, konkrétně 112,91 HB. Na druhou stranu nejnižší hodnota tvrdosti 62,5 HShD byla naměřena pomocí metody SHORE D, viz tabulka (Tab. 16) a obrázek (Obr. 19).

## 2.4.9 PP-50-60°

Tab. 17. Výsledky měření pro PP-50-60°

PP-50-60°				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
x	93,2	62,4	124,46	96,62
s	0,8	0,6	10,67	3,12
δ	0,2	0,1	1,95	0,57



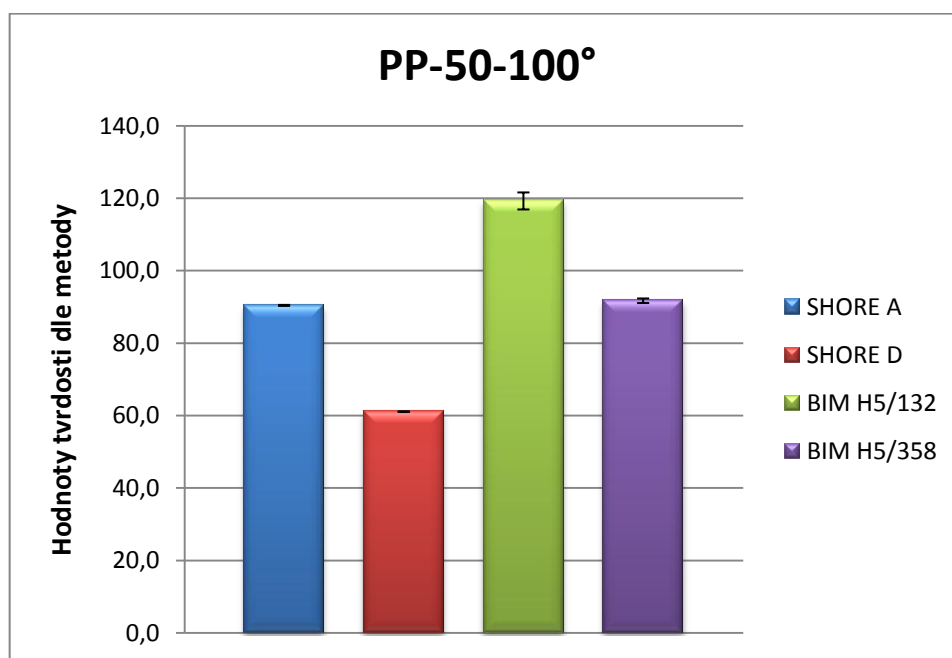
Obr. 20. Tvrdost PP-50-60° dle jednotlivých metod

Nejvyšší hodnota tvrdosti materiálu PP-50-60°, konkrétně 124,46 HB, byla naměřena pomocí metody BIM H5/132. Naproti tomu nejnižší hodnota tvrdosti 62,4 HShD byla zjištěna metodou SHORE D, viz tabulka (Tab. 17) a obrázek (Obr. 20).

## 2.4.10 PP-50-100°

Tab. 18. Výsledky měření pro PP-50-100°

PP-50-100°				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	90,4	61,1	119,27	91,72
<b>s</b>	0,7	0,5	12,89	3,48
<b>δ</b>	0,1	0,1	2,35	0,63



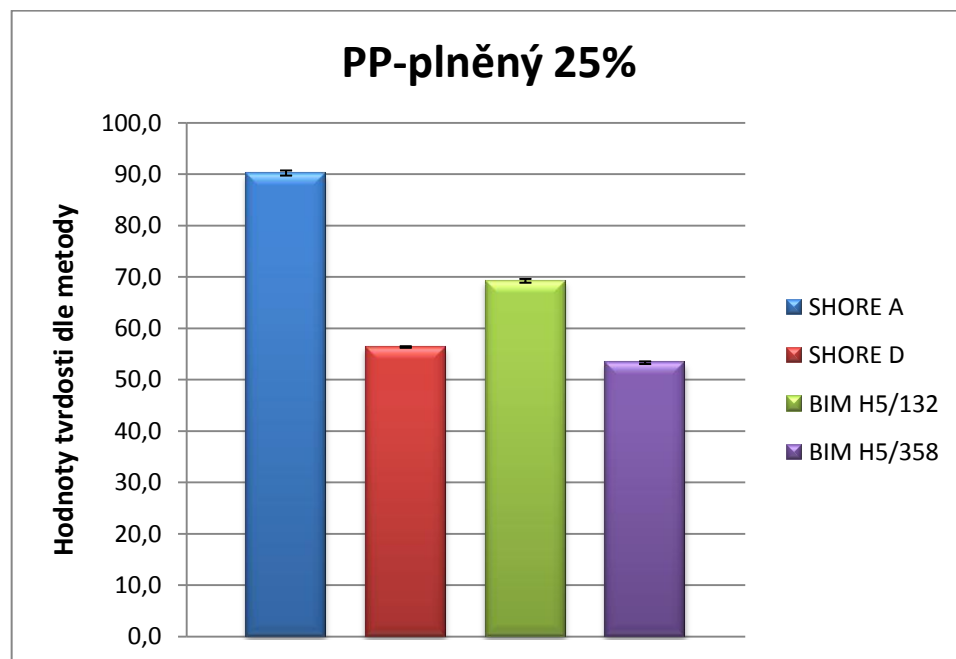
Obr. 21. Tvrdost PP-50-100° dle jednotlivých metod

U materiálu PP-50-100° byla nejnižší hodnota tvrdosti 61,1 HShD zjištěna metodou SHORE D. Nejvyšší hodnota tvrdosti, konkrétně 119,27 HB, byla naměřena pomocí metody BIM H5/132, viz tabulka (Tab. 18) a obrázek (Obr. 21).

## 2.4.11 PP-plněný 25%

Tab. 19. Výsledky měření pro PP-plněný 25%

PP-plněný 25%				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
x	90,2	56,4	69,25	53,32
s	2,7	0,9	2,03	1,40
$\delta$	0,5	0,2	0,37	0,26



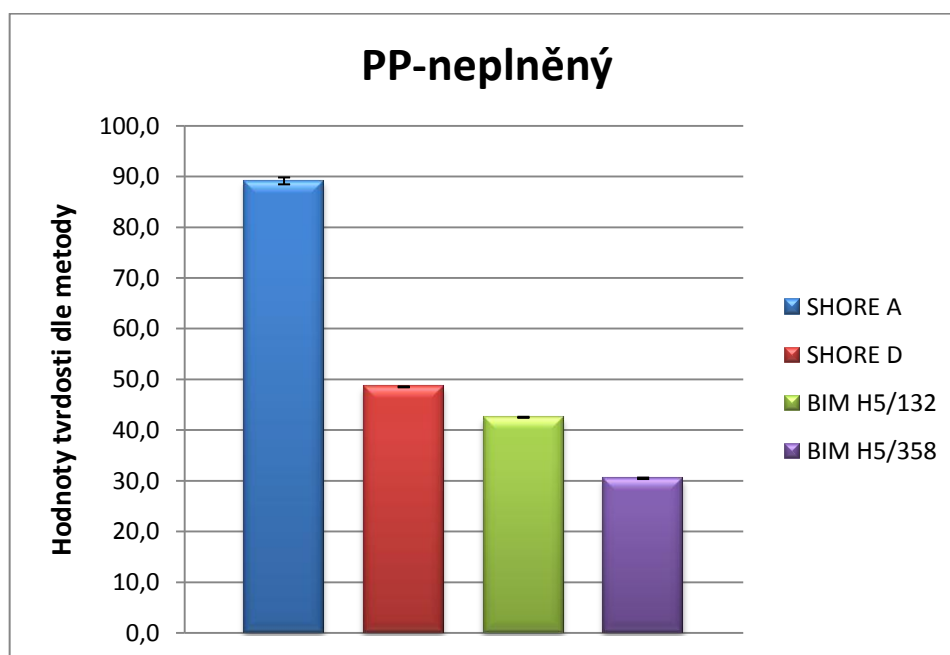
Obr. 22. Tvrdost PP-plněný 25% dle jednotlivých metod

Při měření materiálu PP-plněný 25% byla zjištěna nejvyšší hodnota tvrdosti metodou SHORE A, konkrétně 90,2 HShA. Na druhou stranu nejnižší hodnota tvrdosti 53,32 HB byla naměřena pomocí metody BIM H5/358, viz tabulka (Tab. 19) a obrázek (Obr. 22).

## 2.4.12 PP-neplněný

Tab. 20. Výsledky měření pro PP-neplněný

PP-neplněný				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	89,1	48,5	42,53	30,51
<b>s</b>	3,7	0,5	0,58	0,79
<b>δ</b>	0,7	0,1	0,11	0,14



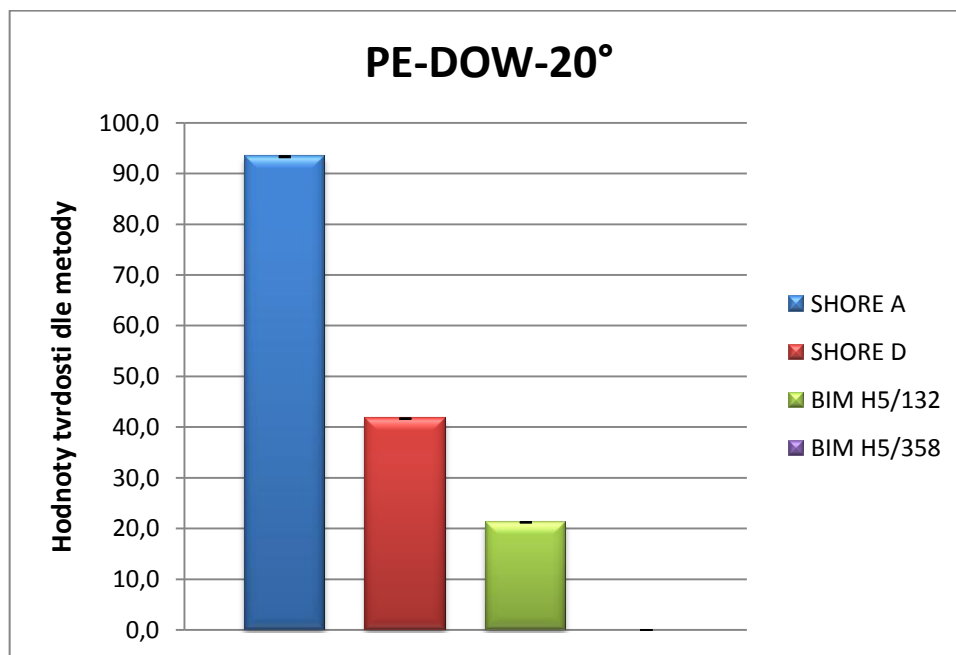
Obr. 23. Tvrdost PP-neplněný dle jednotlivých metod

Z výsledků měření tvrdosti materiálu PP-neplněný je patrné, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna metodou SHORE A, konkrétně 89,1 HShA. Zatímco nejnižší hodnota tvrdosti 30,51 HB byla naměřena pomocí metody BIM H5/358, viz tabulka (Tab. 20) a obrázek (Obr. 23).

## 2.4.13 PE-DOW-20°

Tab. 21. Výsledky měření pro PE-DOW-20°

PE-DOW-20°				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	93,3	41,7	21,23	0,00
<b>s</b>	0,6	0,3	0,24	0,00
<b>δ</b>	0,1	0,1	0,04	0,00



Obr. 24. Tvrdost PE-DOW-20° dle jednotlivých metod

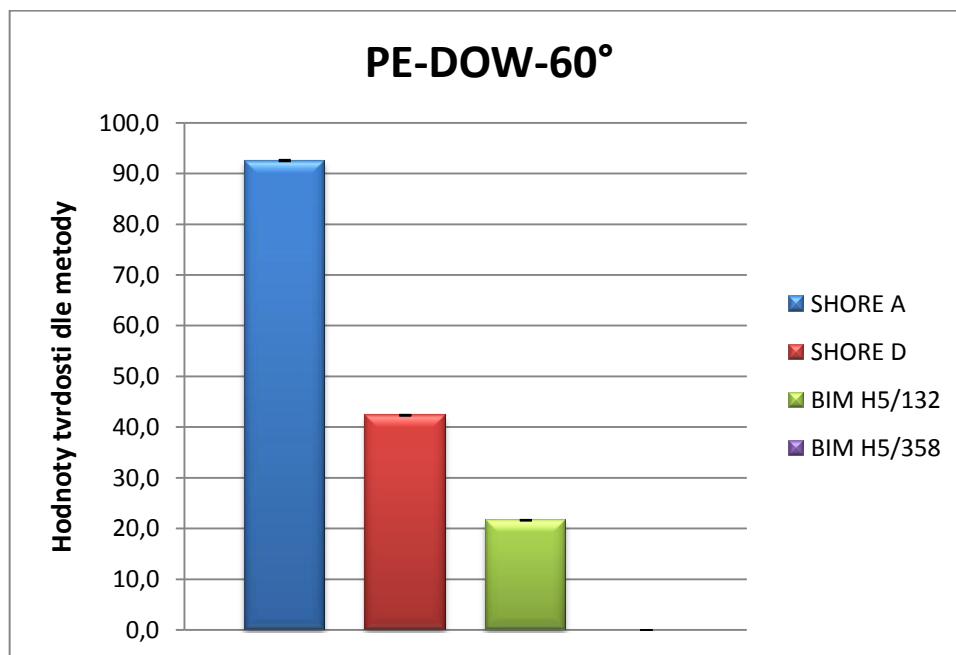
Nejvyšší hodnota tvrdosti materiálu PE-DOW-20°, konkrétně 93,3 HShA, byla naměřena pomocí metody SHORE A. Naproti tomu nejnižší hodnota tvrdosti 21,23 HB byla zjištěna metodou BIM H5/132, viz tabulka (Tab. 21) a obrázek (Obr. 24). Z důvodu příliš nízké tvrdosti daného materiálu, nebylo možné provést měření metodou BIM H5/358.



## 2.4.14 PE-DOW-60°

Tab. 22. Výsledky měření pro PE-DOW-60°

PE-DOW-60°				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	92,6	42,3	21,64	0,00
<b>s</b>	0,7	0,5	0,37	0,00
<b>δ</b>	0,1	0,1	0,07	0,00



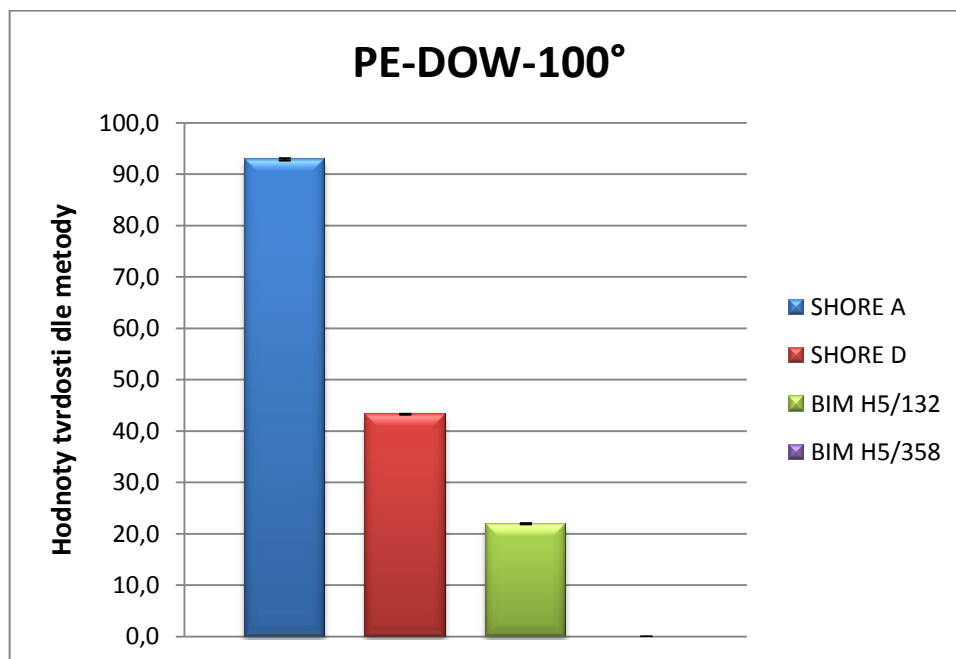
Obr. 25. Tvrdost PE-DOW-60° dle jednotlivých metod

U materiálu PE-DOW-60° byla nejnižší hodnota tvrdosti 21,64 HB zjištěna metodou BIM H5/132. Nejvyšší hodnota tvrdosti, konkrétně 92,6 HShA, byla naměřena pomocí metody SHORE A, viz tabulka (Tab. 22) a obrázek (Obr. 25). Z důvodu příliš nízké tvrdosti daného materiálu, nebylo možné provést měření metodou BIM H5/358.

## 2.4.15 PE-DOW-100°

Tab. 23. Výsledky měření pro PE-DOW-100°

PE-DOW-100°				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	92,9	43,3	21,98	0,00
<b>s</b>	1,2	0,4	0,59	0,00
<b>δ</b>	0,2	0,1	0,11	0,00



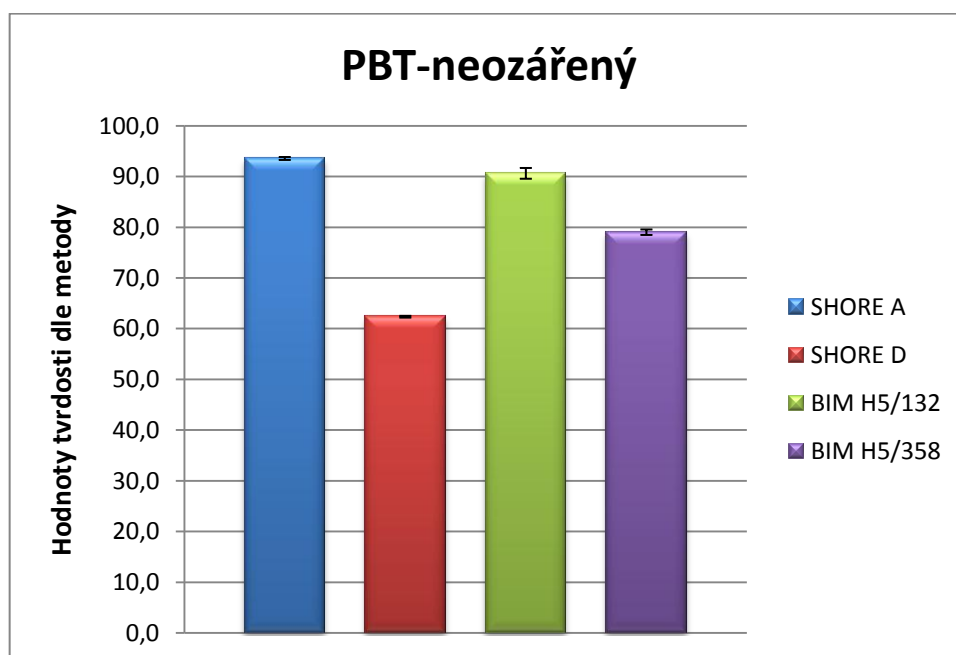
Obr. 26. Tvrdost PE-DOW-100° dle jednotlivých metod

Při měření materiálu PE-DOW-100° byla zjištěna nejvyšší hodnota tvrdosti metodou SHORE A, konkrétně 92,9 HShA. Na druhou stranu nejnižší hodnota tvrdosti 21,98 HB byla naměřena pomocí metody BIM H5/132, viz tabulka (Tab. 23) a obrázek (Obr. 26). Z důvodu příliš nízké tvrdosti daného materiálu, nebylo možné provést měření metodou BIM H5/358.

## 2.4.16 PBT-neozářený

Tab. 24. Výsledky měření pro PBT-neozářený

PBT-neozářený				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	93,6	62,4	90,63	79,03
<b>s</b>	1,6	0,9	5,82	2,97
<b>δ</b>	0,3	0,2	1,06	0,54



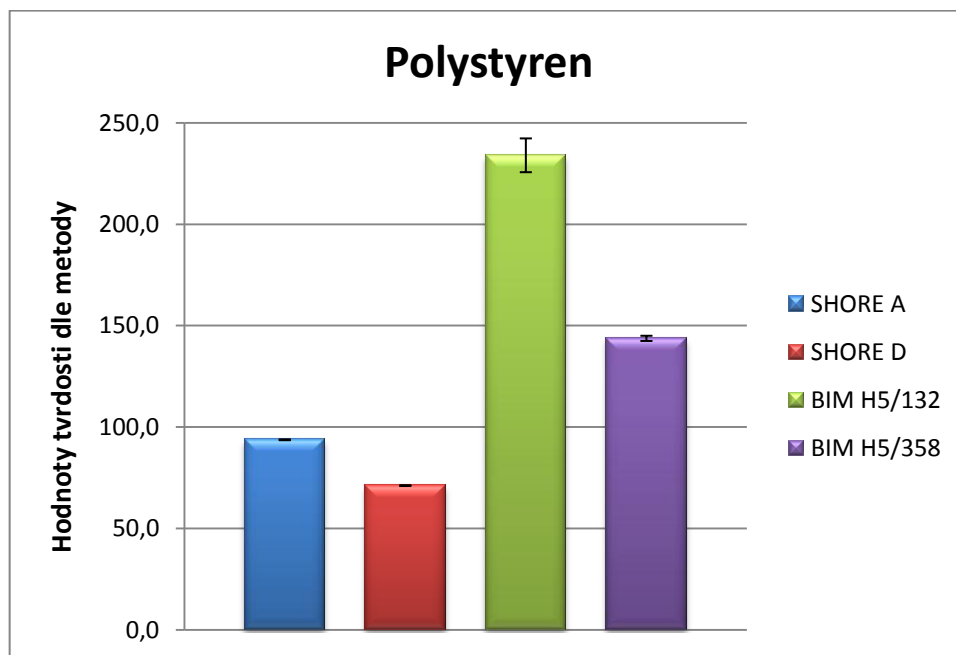
Obr. 27. Tvrdost PBT-neozářený dle jednotlivých metod

Z výsledků měření tvrdosti materiálu PBT-neozářený je patrné, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna metodou SHORE A, konkrétně 93,6 HShA. Zatímco nejnižší hodnota tvrdosti 62,4 HShD byla naměřena pomocí metody SHORE D, viz tabulka (Tab. 24) a obrázek (Obr. 27).

## 2.4.17 Polystyren

Tab. 25. Výsledky měření pro Polystyren

Polystyren				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	93,8	71,2	234,01	143,77
<b>s</b>	1,1	0,6	45,64	7,02
<b>δ</b>	0,2	0,1	8,33	1,28



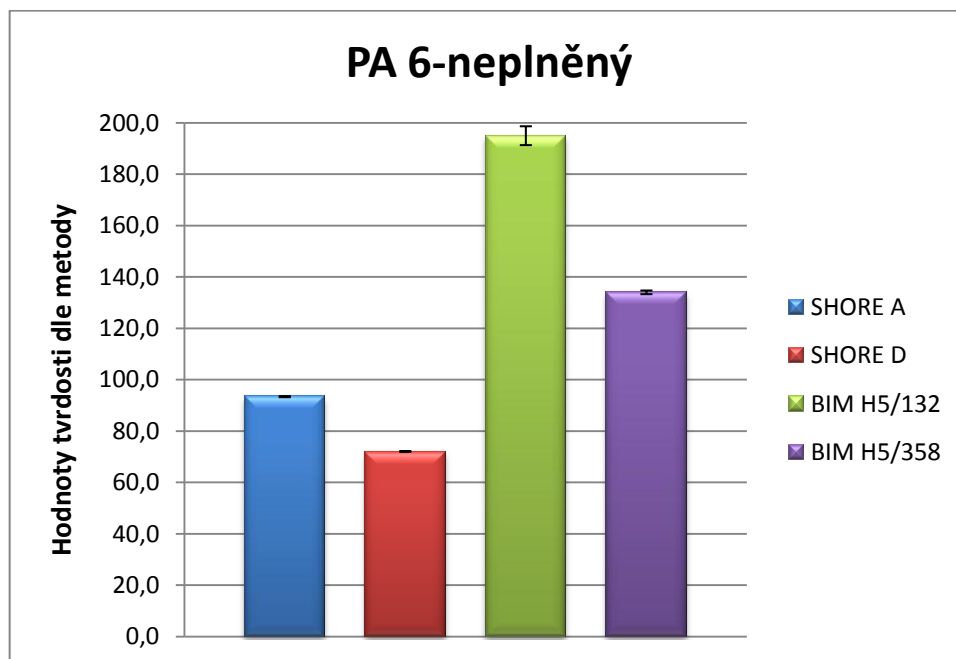
Obr. 28. Tvrdost Polystyren dle jednotlivých metod

Nejvyšší hodnota tvrdosti materiálu Polystyren, konkrétně 234,01 HB, byla naměřena pomocí metody BIM H5/132. Naproti tomu nejnižší hodnota tvrdosti 71,2 HShD byla zjištěna metodou SHORE D, viz tabulka (Tab. 25) a obrázek (Obr. 28).

## 2.4.18 PA 6-neplněný

Tab. 26. Výsledky měření pro PA 6-neplněný

PA 6-neplněný				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	93,4	72,1	195,01	134,03
<b>s</b>	1,1	0,5	20,10	3,90
<b>δ</b>	0,2	0,1	3,67	0,71



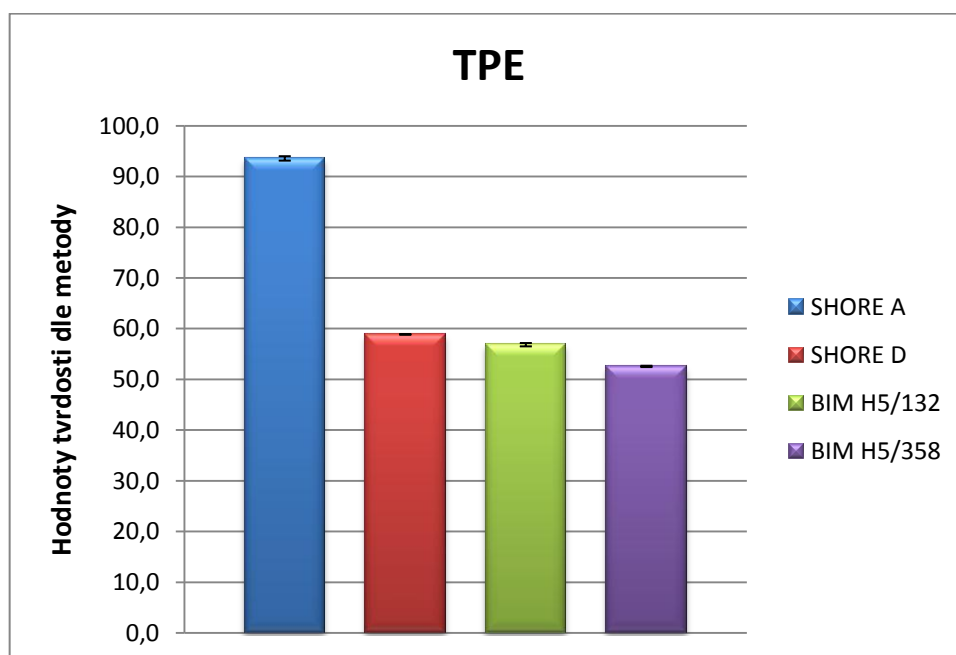
Obr. 29. Tvrdost PA 6-neplněný dle jednotlivých metod

U materiálu PA 6-neplněný byla nejnižší hodnota tvrdosti 72,1 HShD zjištěna metodou SHORE D. Nejvyšší hodnota tvrdosti, konkrétně 195,01 HB, byla naměřena pomocí metody BIM H5/132, viz tabulka (Tab. 26) a obrázek (Obr. 29).

## 2.4.19 TPE

Tab. 27. Výsledky měření pro TPE

TPE				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	93,6	58,9	56,85	52,57
<b>s</b>	2,4	0,3	1,80	0,72
<b>δ</b>	0,4	0,1	0,33	0,13



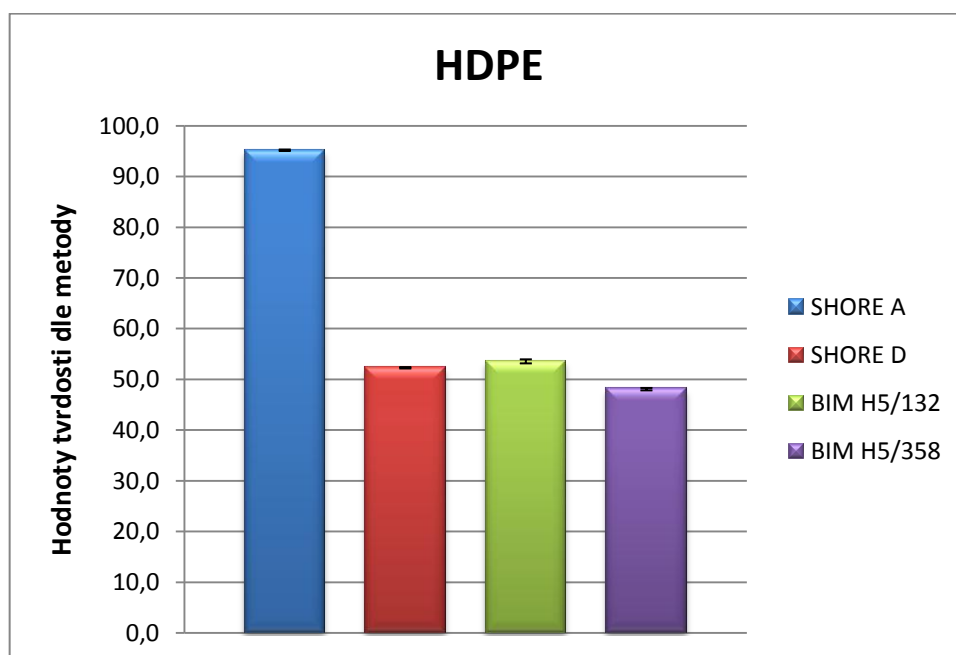
Obr. 30. Tvrdost TPE dle jednotlivých metod

Při měření materiálu TPE byla zjištěna nejvyšší hodnota tvrdosti metodou SHORE A, konkrétně 93,6 HShA. Na druhou stranu nejnižší hodnota tvrdosti 52,57 HB byla naměřena pomocí metody BIM H5/358, viz tabulka (Tab. 27) a obrázek (Obr. 30).

## 2.4.20 HDPE

Tab. 28. Výsledky měření pro HDPE

HDPE				
	SHORE A	SHORE D	BIM H5/132	BIM H5/358
<b>x</b>	95,2	52,3	53,56	48,08
<b>s</b>	0,8	0,7	2,17	1,31
<b>δ</b>	0,1	0,1	0,40	0,24



Obr. 31. Tvrdost HDPE dle jednotlivých metod

Z výsledků měření tvrdosti materiálu HDPE je patrné, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna metodou SHORE A, konkrétně 95,2 HShA. Zatímco nejnižší hodnota tvrdosti 48,08 HB byla naměřena pomocí metody BIM H5/358, viz tabulka (Tab. 28) a obrázek (Obr. 31).

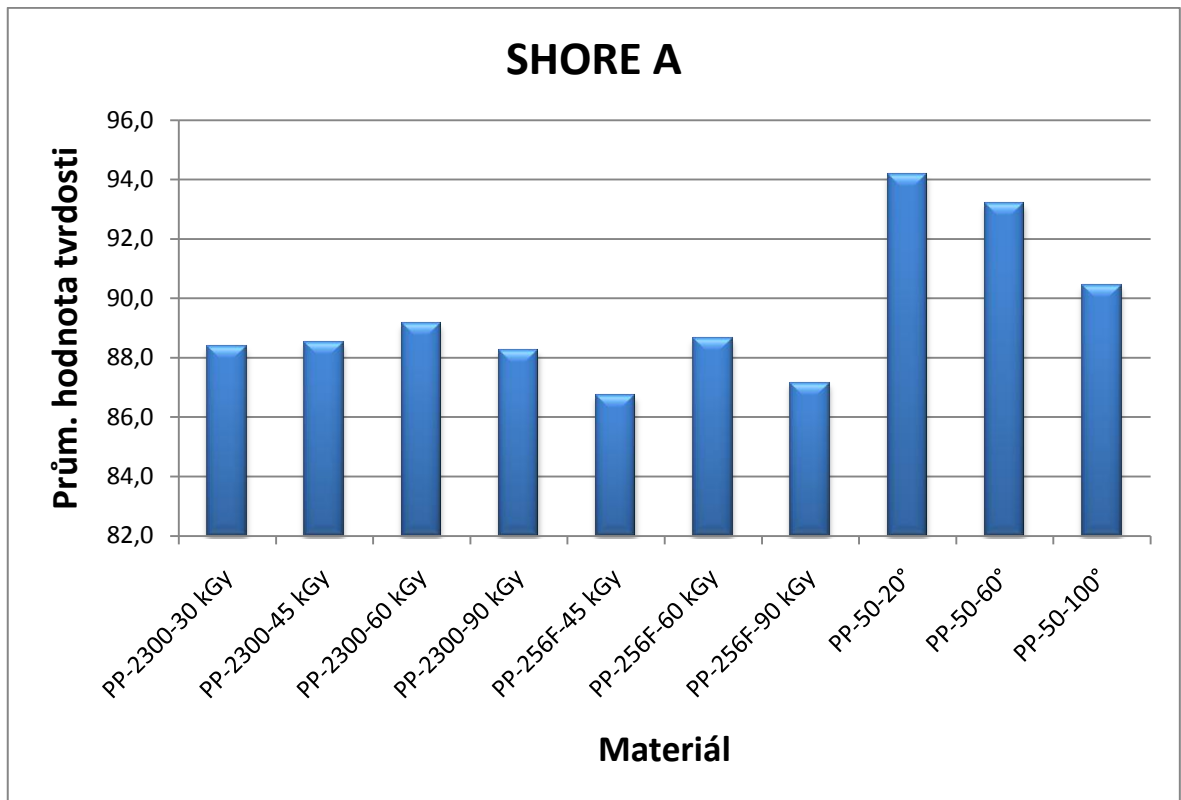
### 3 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Při posuzování tvrdosti pomocí metody SHORE A byla nejvyšší tvrdost naměřena u materiálu HDPE, konkrétně 95,2 HShA. Dále pak u materiálů PP-50-20° (94,2 HShA) a Polystyren (93,8 HShA). Nejnižší tvrdost vykazoval materiál PP-256F-45 kGy, a to 86,7 HShA. Pro měření metodou SHORE A se doporučuje rozsah hodnot 10 až 90 HShA, jelikož více jak polovina vzorků přesáhla tento doporučený rozsah hodnot, nelze tuto metodu považovat za vhodnou pro námi vybranou skupinu vzorků. Kompletní přehled výsledků měření metodou SHORE A je shrnut v tabulce (Tab. 29) a grafické znázornění je na obrázcích (Obr. 32) a (Obr. 33).

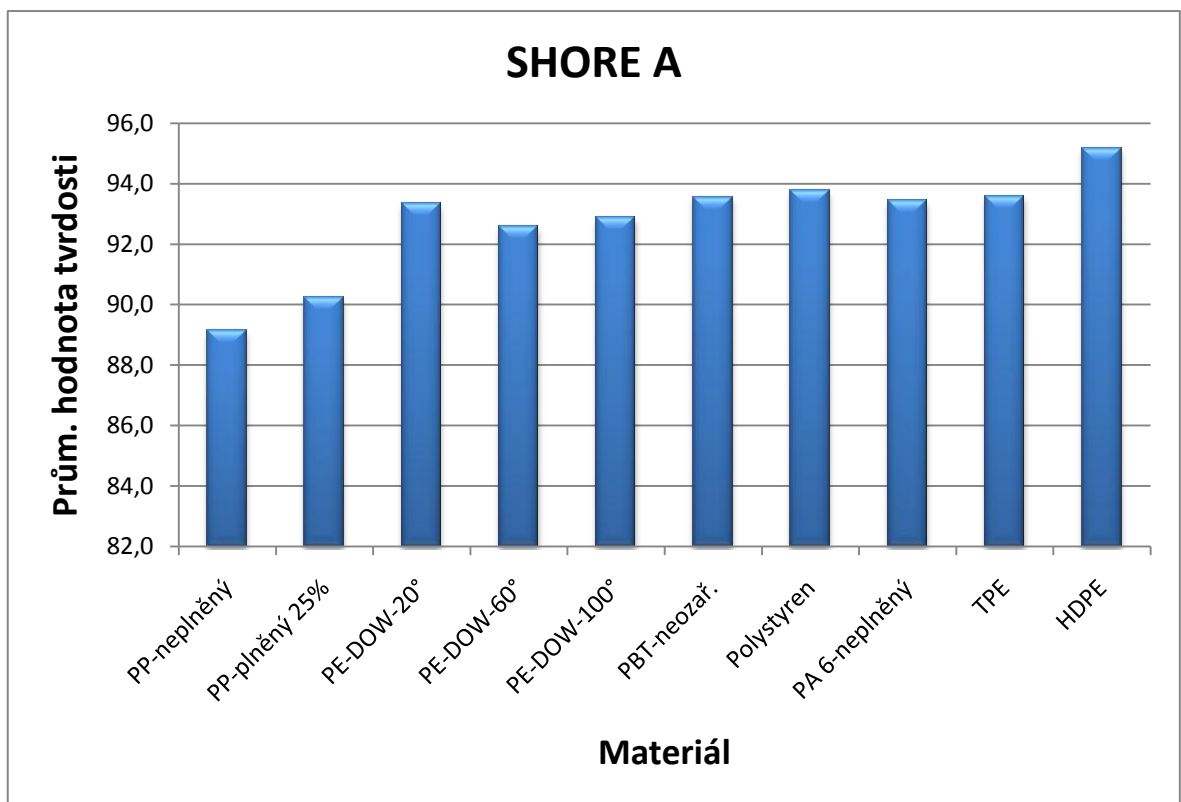
Tab. 29. Výsledky měření metodou SHORE A

SHORE A			
Materiál	x	s	δ
PP-2300-30 kGy	88,4	3,2	0,6
PP-2300-45 kGy	88,5	2,5	0,5
PP-2300-60 kGy	89,2	3,4	0,6
PP-2300-90 kGy	88,3	4,1	0,7
PP-256F-45 kGy	86,7	1,5	0,3
PP-256F-60 kGy	88,7	2,1	0,4
PP-256F-90 kGy	87,2	1,9	0,4
PP-neplněný	89,1	3,7	0,7
PP-plněný 25%	90,2	2,7	0,5
PP-50-20°	94,2	1,0	0,2
PP-50-60°	93,2	0,8	0,2
PP-50-100°	90,4	0,7	0,1
PE-DOW-20°	93,3	0,6	0,1
PE-DOW-60°	92,6	0,7	0,1
PE-DOW-100°	92,9	1,2	0,2
PBT-neozař.	93,6	1,6	0,3
Polystyren	93,8	1,1	0,2
PA 6-neplněný	93,4	1,1	0,2
TPE	93,6	2,4	0,4
HDPE	95,2	0,8	0,1





Obr. 32. Tvrdost dle metody SHORE A

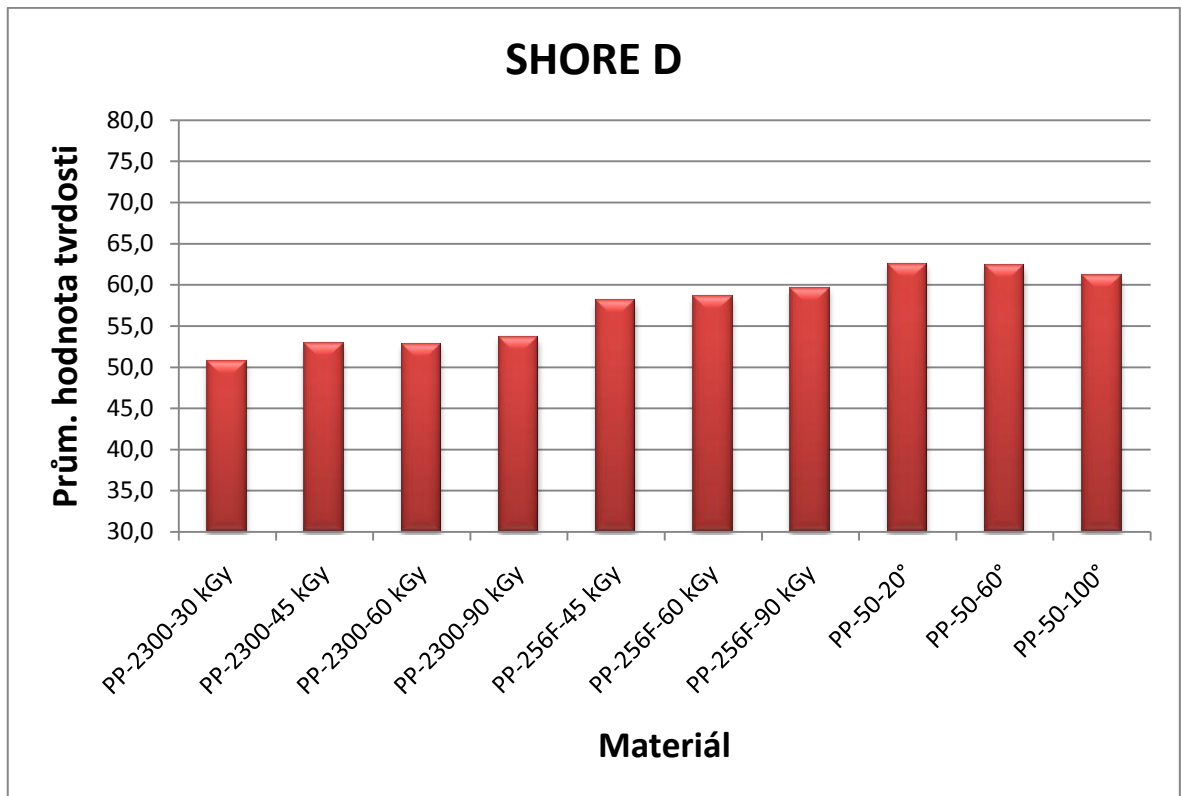


Obr. 33. Tvrdost dle metody SHORE A

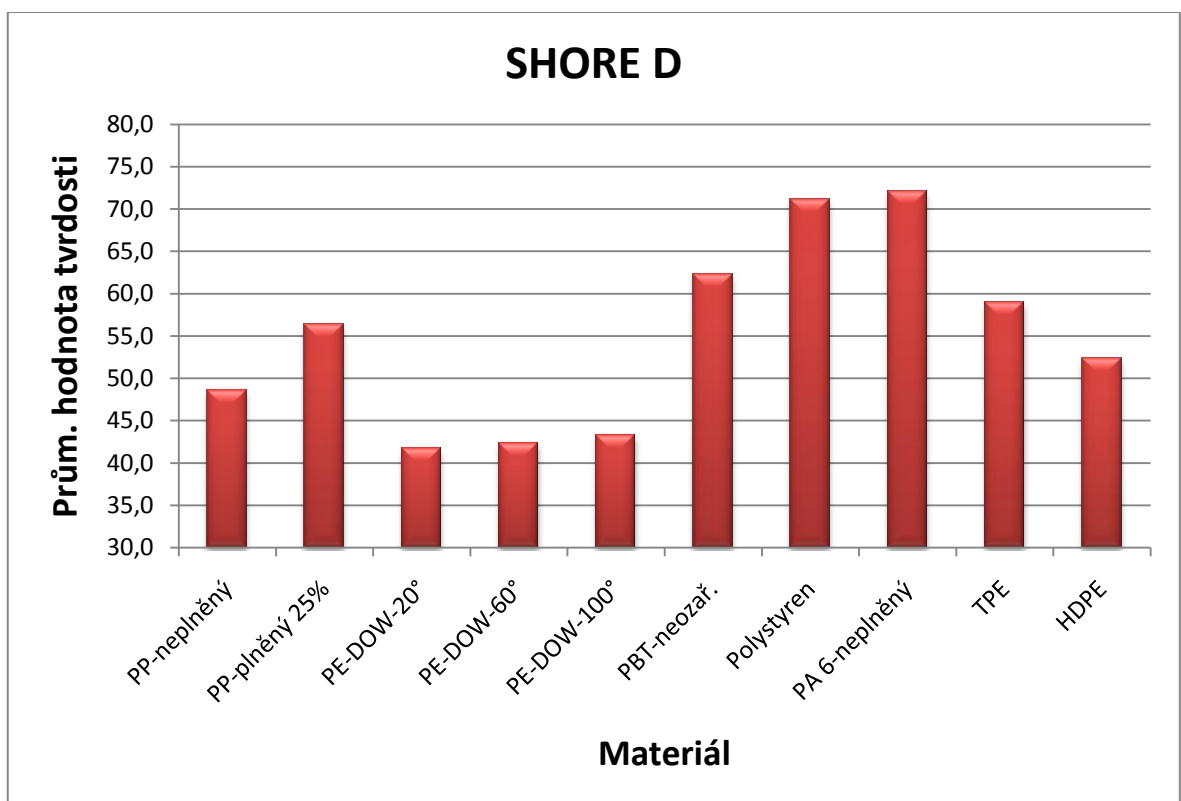
Z výsledků měření tvrdosti pomocí metody SHORE D je patrné, že nejvyšší tvrdosti dosahuje materiál PA 6-neplněný, konkrétně 72,1 HShD. Velmi podobné hodnoty dosáhl i Polystyren, a to 71,2 HShD, dále pak již s odstupem materiál PP-50-20° (62,5 HShD). Naopak nejnižší tvrdost byla naměřena u celé skupinky vzorků PE-DOW, kde se jako nejméně tvrdý ukázal PE-DOW-20° s hodnotou 41,7 HShD. Měření proběhlo u všech vzorků bez problémů a lze tedy tuto metodu považovat za velmi vhodnou pro námi vybranou skupinu vzorků. Kompletní přehled výsledků měření metodou SHORE D je shrnut v tabulce (Tab. 30) a grafické znázornění je na obrázcích (Obr. 34) a (Obr. 35).

Tab. 30. Výsledky měření metodou SHORE D

<b>SHORE D</b>			
Materiál	x	s	δ
PP-2300-30 kGy	50,8	0,8	0,1
PP-2300-45 kGy	52,9	0,7	0,1
PP-2300-60 kGy	52,8	2,1	0,4
PP-2300-90 kGy	53,6	1,2	0,2
PP-256F-45 kGy	58,0	0,6	0,1
PP-256F-60 kGy	58,6	1,1	0,2
PP-256F-90 kGy	59,6	0,8	0,1
PP-neplněný	48,5	0,5	0,1
PP-plněný 25%	56,4	0,9	0,2
PP-50-20°	62,5	0,8	0,1
PP-50-60°	62,4	0,6	0,1
PP-50-100°	61,1	0,5	0,1
PE-DOW-20°	41,7	0,3	0,1
PE-DOW-60°	42,3	0,5	0,1
PE-DOW-100°	43,3	0,4	0,1
PBT-neozař.	62,4	0,9	0,2
Polystyren	71,2	0,6	0,1
PA 6-neplněný	72,1	0,5	0,1
TPE	58,9	0,3	0,1
HDPE	52,3	0,7	0,1



Obr. 34. Tvrdost dle metody SHORE D

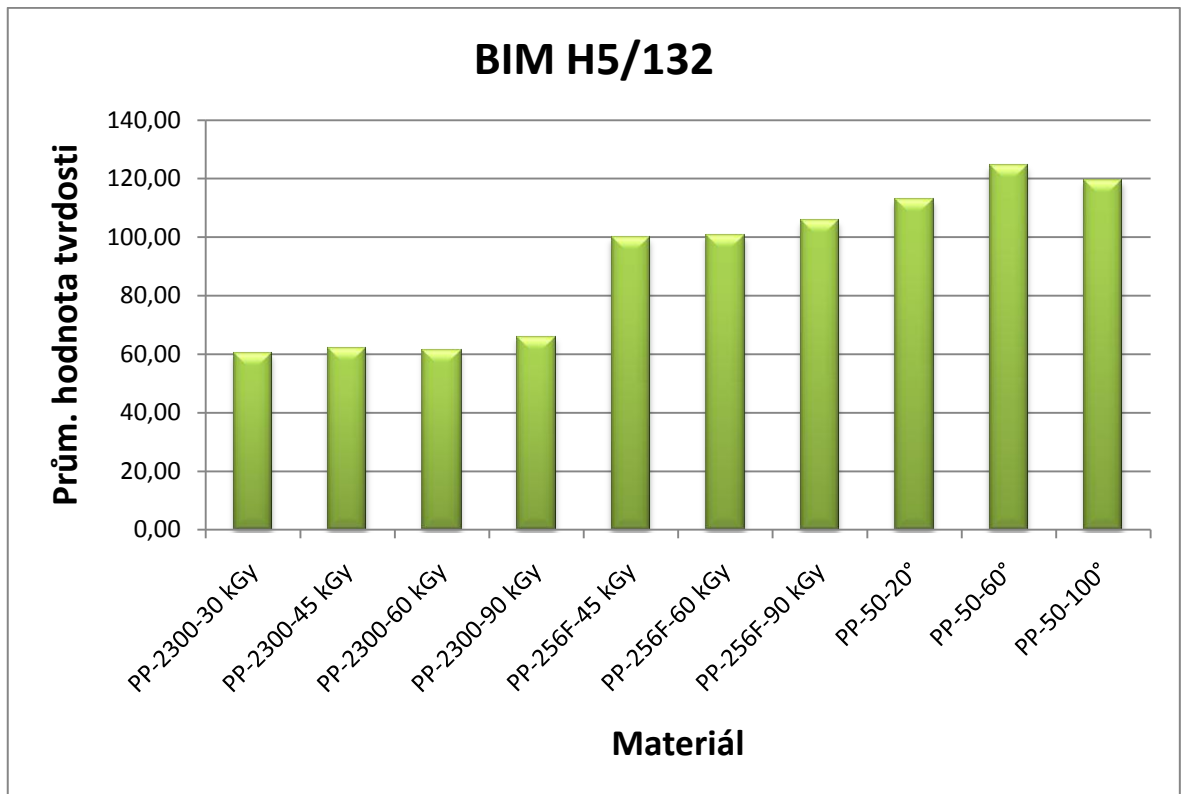


Obr. 35. Tvrdost dle metody SHORE D

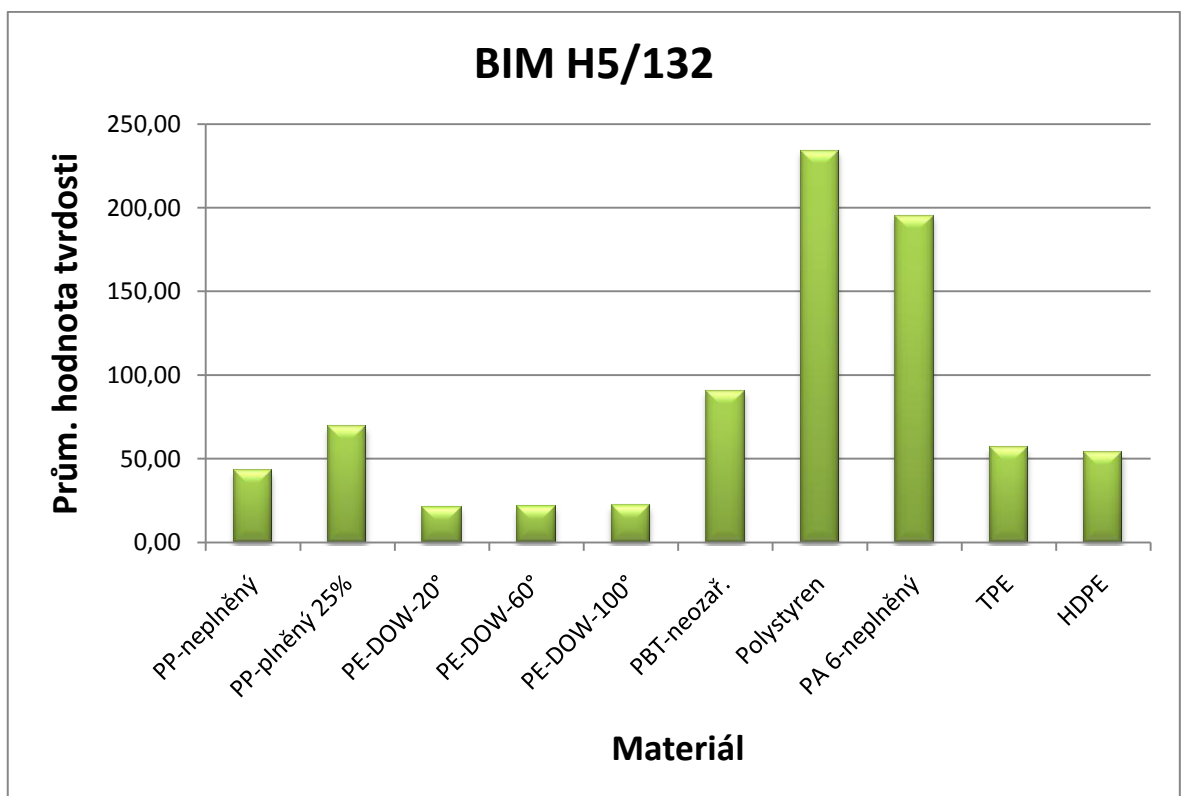
U metody BIM H5/132 byla nejvyšší tvrdost 234,01 HB naměřena u materiálu Polystyren, dále pak 195,01 HB u PA 6-neplněný a 124,46 HB u materiálu PP-50-60°. Stejně jako u metody SHORE D i zde nejnižší tvrdosti dosáhla skupinka vzorků PE-DOW, nejméně PE-DOW-20° (21,23 HB). Tvrdost se podařilo naměřit u všech vzorků a lze tedy tuto metodu považovat za vhodnou pro námi vybranou skupinu vzorků. Kompletní přehled výsledků měření metodou BIM H5/132 je shrnut v tabulce (Tab. 31) a grafické znázornění je na obrázcích (Obr. 36) a (Obr. 37).

Tab. 31. Výsledky měření metodou BIM H5/132

BIM H5/132			
Materiál	x	s	$\delta$
PP-2300-30 kGy	60,24	1,68	0,31
PP-2300-45 kGy	62,10	2,27	0,41
PP-2300-60 kGy	61,38	2,06	0,38
PP-2300-90 kGy	66,01	1,69	0,31
PP-256F-45 kGy	99,90	2,48	0,45
PP-256F-60 kGy	100,57	5,68	1,04
PP-256F-90 kGy	105,57	6,30	1,15
PP-neplněný	42,53	0,58	0,11
PP-plněný 25%	69,25	2,03	0,37
PP-50-20°	112,91	8,03	1,47
PP-50-60°	124,46	10,67	1,95
PP-50-100°	119,27	12,89	2,35
PE-DOW-20°	21,23	0,24	0,04
PE-DOW-60°	21,64	0,37	0,07
PE-DOW-100°	21,98	0,59	0,11
PBT-neozař.	90,63	5,82	1,06
Polystyren	234,01	45,64	8,33
PA 6-neplněný	195,01	20,10	3,67
TPE	56,85	1,80	0,33
HDPE	53,56	2,17	0,40



Obr. 36. Tvrdost dle metody BIM H5/132

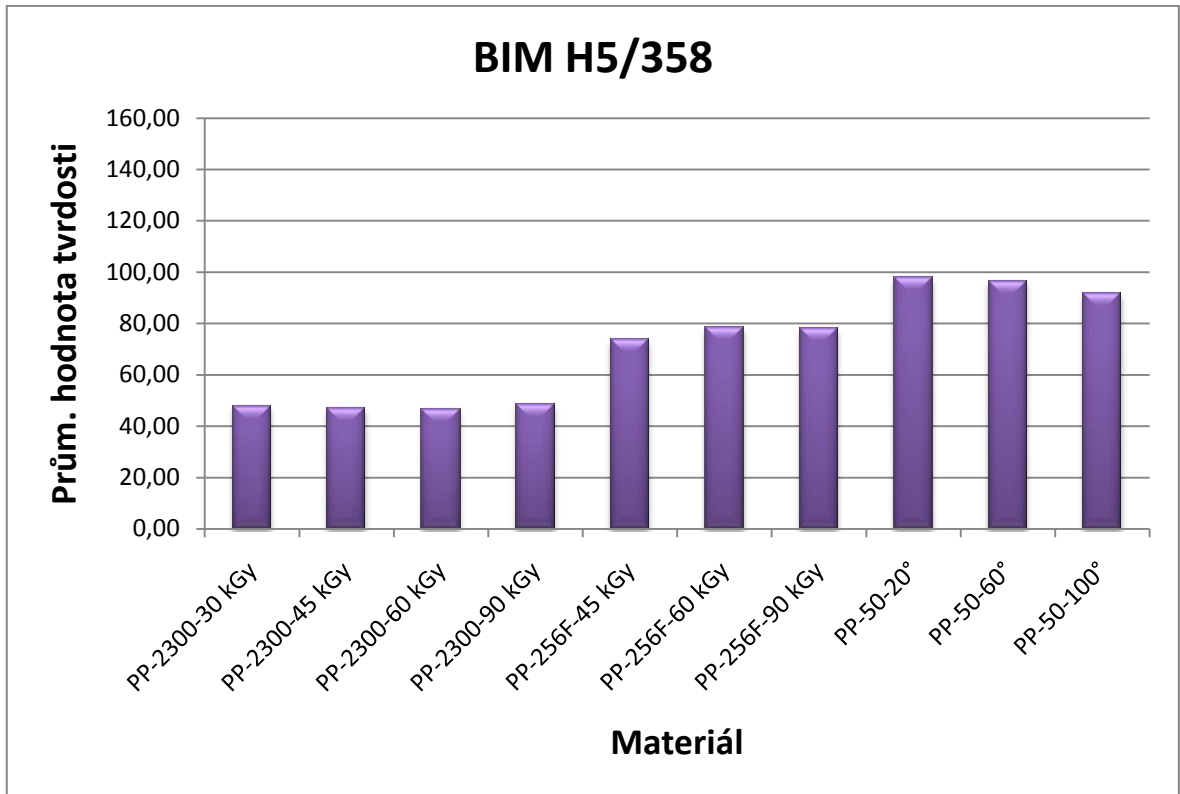


Obr. 37. Tvrdost dle metody BIM H5/132

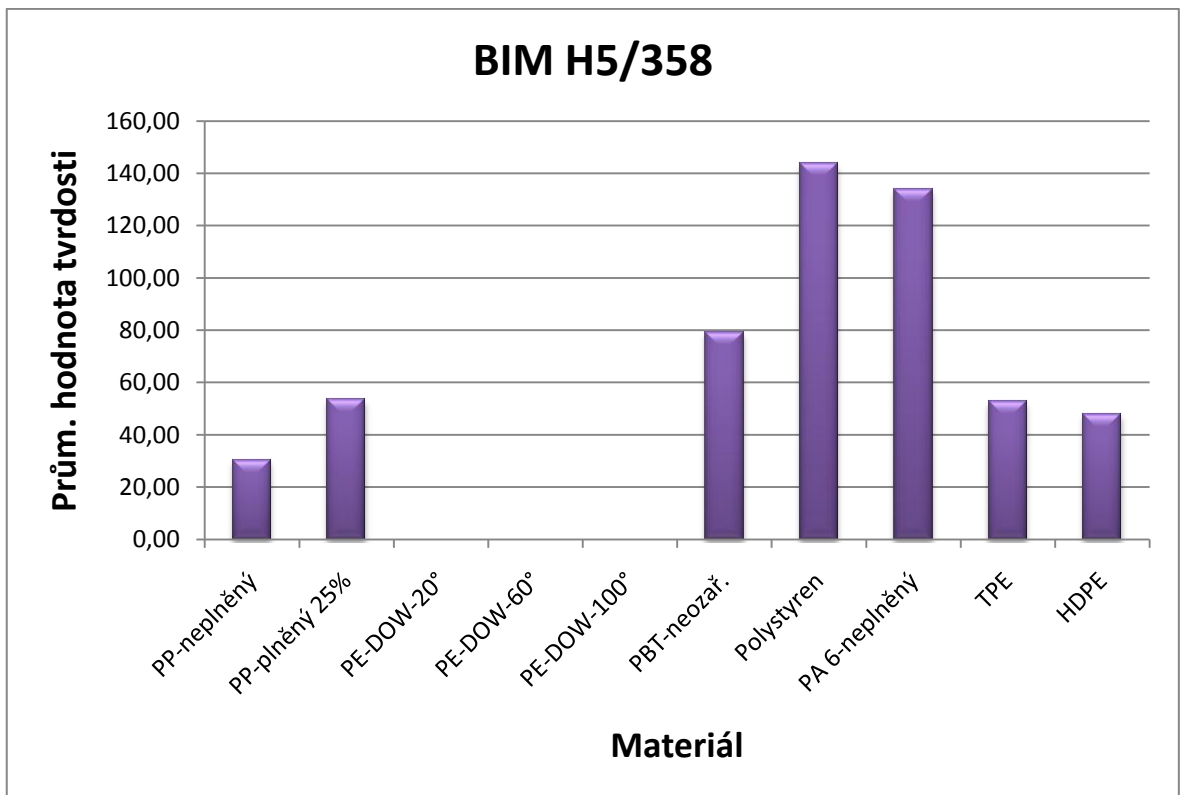
Při hodnocení tvrdosti metodou BIM H5/358 byla nejvyšší tvrdost stejně jako u metody BIM H5/132 naměřena u vzorku Polystyren, konkrétně 143,77 HB. I u druhého nejtvrďšího materiálu z vybrané skupiny se metody shodují, pro zatížení 358 N dosáhl PA 6-neplněný tvrdosti 134,03 HB. Dále pak materiál PP-50-20° s hodnotou 97,84 HB. Nejnižší tvrdost vykazoval vzorek PP-neplněný, a to 30,51 HB. Skupinku vzorků PE-DOW nebylo možné metodou BIM H5/358 změřit, hloubka vtlačení zde byla příliš velká. Při použití metody BIM H5/358 se nepodařilo změřit všechny vzorky, ale i tak lze metodu považovat za vhodnou s výjimkou skupinky PE-DOW. Kompletní přehled výsledků měření metodou BIM H5/358 je shrnut v tabulce (Tab. 32) a grafické znázornění je na obrázcích (Obr. 38) a (Obr. 39).

Tab. 32. Výsledky měření metodou BIM H5/358

BIM H5/358			
Materiál	x	s	δ
PP-2300-30 kGy	47,86	3,09	0,56
PP-2300-45 kGy	46,93	0,51	0,09
PP-2300-60 kGy	46,71	0,93	0,17
PP-2300-90 kGy	48,63	0,91	0,17
PP-256F-45 kGy	73,54	2,37	0,43
PP-256F-60 kGy	78,35	1,79	0,33
PP-256F-90 kGy	78,05	1,89	0,34
PP-neplněný	30,51	0,79	0,14
PP-plněný 25%	53,32	1,40	0,26
PP-50-20°	97,84	4,90	0,90
PP-50-60°	96,62	3,12	0,57
PP-50-100°	91,72	3,48	0,63
PE-DOW-20°	0	0,00	0,00
PE-DOW-60°	0	0,00	0,00
PE-DOW-100°	0	0,00	0,00
PBT-neozař.	79,03	2,97	0,54
Polystyren	143,77	7,02	1,28
PA 6-neplněný	134,03	3,90	0,71
TPE	52,57	0,72	0,13
HDPE	48,08	1,31	0,24



Obr. 38. Tvrdost dle metody BIM H5/358



Obr. 39. Tvrdost dle metody BIM H5/358

## ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti polymerů. K praktické části bylo zvoleno 20 vzorků polymerních materiálů (PP-2300 s různou dávkou ozáření, PP-256F s různou dávkou ozáření, PP-50 který byl vystaven různým teplotám, PP plněný z 25 % skelnými vlákny, PP neplněný, PE-DOW který byl vystaven různým teplotám, PBT neozářený, Polystyren, PA 6 neplněný, TPE a HDPE). Pro zjištění tvrdosti daných vzorků byly použity metody SHORE A, SHORE D a metoda vtlačení kuličky (BIM) pro zatížení 132 N a 358 N. Měření každého vzorku pro jednotlivé metody bylo provedeno 30 krát. Získaná data byla vyhodnocena, graficky zpracována a výsledky byly mezi sebou srovnány.

Z výsledků měření vyplývá, že jako velmi vhodné metody pro vybranou skupinu polymerních materiálů se ukazují metody SHORE D a BIM pro zatížení 132 N. Pomocí těchto metod bylo změřeno všech 20 vzorků. A naopak jako méně vhodná se ukázala metoda BIM pro zatížení 358 N. U této metody se nepodařilo určit tvrdost u skupinky vzorků PE-DOW.

Metodu SHORE A nelze pro vybranou skupinu vzorků doporučit, neboť se u více jak poloviny materiálů naměřené hodnoty tvrdosti pohybovaly v oblasti, kde je již doporučeno použití metody SHORE D. I zbylé vzorky se jen těsně vešly do doporučené oblasti. Na základě tohoto zjištění nelze z této metody vyvodit konkrétní závěry.

Z měřených vzorků vykazovaly nejvyšší tvrdost Polystyren a PA 6-neplněný, dále pak již s odstupem skupinka vzorků PP-50. Naproti tomu nejnižších hodnot dosahovala skupinka PE-DOW a neplněný PP.

Měření prokázalo, že přidáním skelných vláken se u Polypropylenu zvýší tvrdost. Výrazně se to projevilo při měření metodami BIM, ale i u metody SHORE D je rozdíl dosti patrný.

Vliv velikosti dávky ozáření elektronovým beta zářením se u materiálu PP-2300 projevoval jen nepatrně. Nejvyšší tvrdosti dosahoval vzorek po ozáření dávkou 90 kGy, nejvíce je to zřejmé u metody BIM pro zatížení 132 N. U materiálu PP-256F se vliv velikosti dávky ozáření projevil zvyšováním tvrdosti. I zde platí, že nejvyšší tvrdosti dosáhl vzorek s největší dávkou ozáření. Nejlépe je to vidět u metody BIM pro zatížení 132 N.

Materiál PP-50 byl vystaven různým teplotám. Z měření metodami SHORE D a BIM pro zatížení 358 N je zřejmé, že s rostoucí teplotou klesá tvrdost materiálu. U metody BIM pro zatížení 132 N toto patrně není, zde ale došlo k větším odchýlkám, které mohly výsledek ovlivnit. Také PE-DOW byl vystaven různým teplotám. Dle výsledků metod SHORE D



a BIM pro zatížení 132 N u tohoto materiálu naopak dochází k velmi mírnému zvyšování tvrdosti s rostoucí teplotou.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] ČSN ISO 48. *Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický eleastomer – Stanovení tvrdosti (tvrdost mezi 10 IRHD a 100 IRHD)*. Praha : Český normalizační institut, 2008. 24 s.
- [2] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtláčováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha : Český normalizační institut, 2003. 12 s.
- [3] ČSN EN ISO 2039-1. *Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1 : Metoda vtláčením kuličky*. Praha : Český normalizační institut, 2003. 12 s.
- [4] ČSN EN ISO 2039-2. *Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 2 : Tvrdost dle Rockwella*. Praha : Český normalizační institut, 2000. 12 s.
- [5] HORÁČEK, Jaroslav. *Nauka o materiálu*. 1. Praha : Katedra materiálu a strojírenské technologie TF ČZU v Praze, 2000. 71 s. ISBN 80-213-0397-2
- [6] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie 1 - 1. díl : Nauka o materiálu* . 3. vyd. Praha : Scientia, 2002. 266 s. ISBN 978-80-86960-26-5
- [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] SCHATZ, Miroslav, VONDRÁČEK, Petr. *Zkoušení polymeru* . 1. vyd. Praha : SNTL-nakladatelství technické literatury, 1979. 264 s.
- [10] ALLEN, Robert . Article Alley [online]. 11.12.2006 [cit. 2011-01-28]. Barcol Hardness Testing And Its Applications. Dostupné z WWW: <[http://www.articlealley.com/article\\_111189\\_47.html](http://www.articlealley.com/article_111189_47.html)>.
- [11] CCSi [online]. 2006 [cit. 2011-01-29]. Barcol Impressor. Dostupné z WWW: <<http://www.ccsi-inc.com/p-hardness-barcol.htm>>.
- [12] IDES - The Plastics Web [online]. 2011 [cit. 2011-01-28]. Barcol Hardness - ASTM D2583. Dostupné z WWW: <[http://www.ides.com/property\\_descriptions/ASTMD2583.asp](http://www.ides.com/property_descriptions/ASTMD2583.asp)>.
- [13] LUDVÍK, Jan; BÍLEK, Karel; LUDVÍK, Štěpán. *Metrotest* [online]. 22.11.2010 [cit. 2011-02-01]. Zkoušky tvrdosti. Dostupné z WWW: <[http://www.metrotest.cz/files/zkousky\\_tvrdosti.pdf](http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrdosti.pdf)>.

- [14] MOLLIKOVÁ, Eva. *ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ* [online]. 2005 [cit. 2011-02-02]. Dělení metod určování tvrdosti. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/2%20deleni%20metod%20urcovani%20tvrlosti.doc>>.
- [15] MOLLIKOVÁ, Eva. *ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ* [online]. 2005 [cit. 2011-02-03]. Zkouška tvrdosti podle Rockwella. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/zkouska%20tvrlosti%20podle%20rockwella.doc>>.
- [16] MOLLIKOVÁ, Eva. *ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ* [online]. 2005 [cit. 2011-02-04]. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/zkouska%20tvrlosti%20podle%20vickerse.doc>>.
- [17] *Qualitest* [online]. 2003 [cit. 2011-01-28]. Universal Hardness Testing Machine - M4U . Dostupné z WWW: <<http://www.worldoftest.com/universalm4u.htm>>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ASTM	Americká norma.
BIM	Ball Indentation Method = metoda vtlačení kuličky.
ČSN	Česká státní norma.
D	Průměr kuličky.
d	Průměr okraje důlku.
$d_h$	Hloubka vtlačení v 15 s.
$d_s$	Konstantní odečet.
DIN	Německá norma.
e	Hloubka vtlačení po odstranění přídavného zatížení.
E	Youngův modul.
EN	Evropská norma.
F	Zkušební zatížení.
$F_0$	Počáteční zatížení.
$F_m$	Zkušební zatížení.
$F_r$	Redukované zkušební zatížení.
H	Tvrдость dle ISO 2039-1.
h	Hloubka vtlačení.
$h_1$	Hloubka vtlačení pod zatížením.
$h_2$	Deformace rámu přístroje.
HB	Tvrдость vtlačení kuličky.
HDPE	Vysokohustotní polyethylen.
$h_{ir}$	Ireverzibilní hloubka.
$h_r$	Redukovaná hloubka vtisku.
HR	Hodnota tvrdosti podle Rockwella.

---

$h_{rev}$	Reverzibilní hloubka.
HShA	Tvrdomost dle Shore A.
HShD	Tvrdomost dle Shore D.
HV	Hodnota tvrdosti podle Vickerse.
IRHD	International Rubber Hardness Degree = Mezinárodní stupeň tvrdosti pryže.
ISO	Mezinárodní norma.
mm	Milimetr.
n	Počet měření.
N	Newton.
PA 6	Polyamid 6.
PBT	Polybutylentereftalát.
PE	Polyethylen.
PP	Polypropylen.
r	Poloměr kuličky.
$R\alpha$	Hodnota tvrdosti dle Rockwella $\alpha$ .
s	Směrodatná odchylka.
S	Plocha vtisku.
TPE	Termoplastický elastomer.
u	Aritmetický průměr úhlopříček.
$u_1$	Délka úhlopříčky.
$u_2$	Délka úhlopříčky.
x	Aritmetický průměr.
$\delta$	Střední kvadratická chyba aritmetického průměru.
$\mu$	Poissonova konstanta.
$\pi$	Ludolfovo číslo.

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1. Princip metody vtačením kuličky [7, 9] .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2. Univerzální tvrdoměr M4U [17] .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3. Princip měření tvrdosti dle Rocwella [15] .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4. Schéma zkušebního zařízení pro měření tvrdosti dle Rockwella [15].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 5. Princip měření tvrdosti dle Vickerse [16] .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 6. Schéma zkušebního zařízení pro měření tvrdosti dle Vickerse [16] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 7. Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti dle Vickerse [6].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 8. Princip měření tvrdosti Shore [2] .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 9. Tvar indentoru tvrdoměru Barcol [12] .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 10. Tvrdoměr Barcol [11] .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 11. Tvar a rozměry zkušebních vzorků .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 12. Tvrdost PP-2300-30 kGy dle jednotlivých metod.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 13. Tvrdost PP-2300-45 kGy dle jednotlivých metod.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 14. Tvrdost PP-2300-60 kGy dle jednotlivých metod.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 15. Tvrdost PP-2300-90 kGy dle jednotlivých metod.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 16. Tvrdost PP-256F-45 kGy dle jednotlivých metod .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 17. Tvrdost PP-256F-60 kGy dle jednotlivých metod .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 18. Tvrdost PP-256F-90 kGy dle jednotlivých metod .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 19. Tvrdost PP-50-20° dle jednotlivých metod .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 20. Tvrdost PP-50-60° dle jednotlivých metod .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 21. Tvrdost PP-50-100° dle jednotlivých metod .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 22. Tvrdost PP-plněný 25% dle jednotlivých metod .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 23. Tvrdost PP-neplněný dle jednotlivých metod.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 24. Tvrdost PE-DOW-20° dle jednotlivých metod .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 25. Tvrdost PE-DOW-60° dle jednotlivých metod .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 26. Tvrdost PE-DOW-100° dle jednotlivých metod .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 27. Tvrdost PBT-neozářený dle jednotlivých metod.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 28. Tvrdost Polystyren dle jednotlivých metod .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 29. Tvrdost PA 6-neplněný dle jednotlivých metod .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 30. Tvrdost TPE dle jednotlivých metod .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 31. Tvrdost HDPE dle jednotlivých metod .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 32. Tvrdost dle metody SHORE A .....</i>	<i>65</i>

---

<i>Obr. 33. Tvrдост dle metody SHORE A .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 34. Tvrдост dle metody SHORE D .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 35. Tvrдост dle metody SHORE D .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 36. Tvrдост dle metody BIM H5/132 .....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 37. Tvrдост dle metody BIM H5/132 .....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 38. Tvrдост dle metody BIM H5/358 .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 39. Tvrдост dle metody BIM H5/358 .....</i>	<i>71</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Pr. kuličky, zk. zatížení a doba jeho působení pro metodu vlač. kuličky [3]</i> .....	19
<i>Tab. 2. Stupnice tvrdosti Rockwell, zatížení a průměr kuličky [4]</i> .....	23
<i>Tab. 3. Rozdělení metody Vickers [13]</i> .....	29
<i>Tab. 4. Rozměry zkušebního zařízení a velikost sil pro jednotlivé metody IRHD [1]</i> .....	36
<i>Tab. 5. Min. vzdálenost bodu měření od okrajů zk. vzorku pro metody N, H a L [1]</i> .....	37
<i>Tab. 6. Rozdělení tvrdoměrů Barcol</i> .....	38
<i>Tab. 7. Použité metody</i> .....	41
<i>Tab. 8. Přehled vybraných vzorků pro praktickou část</i> .....	42
<i>Tab. 9. Výsledky měření pro PP-2300-30 kGy</i> .....	44
<i>Tab. 10. Výsledky měření pro PP-2300-45 kGy</i> .....	45
<i>Tab. 11. Výsledky měření pro PP-2300-60 kGy</i> .....	46
<i>Tab. 12. Výsledky měření pro PP-2300-90 kGy</i> .....	47
<i>Tab. 13. Výsledky měření pro PP-256F-45 kGy</i> .....	48
<i>Tab. 14. Výsledky měření pro PP-256F-60 kGy</i> .....	49
<i>Tab. 15. Výsledky měření pro PP-256F-90 kGy</i> .....	50
<i>Tab. 16. Výsledky měření pro PP-50-20°</i> .....	51
<i>Tab. 17. Výsledky měření pro PP-50-60°</i> .....	52
<i>Tab. 18. Výsledky měření pro PP-50-100°</i> .....	53
<i>Tab. 19. Výsledky měření pro PP-plněný 25%</i> .....	54
<i>Tab. 20. Výsledky měření pro PP-neplněný</i> .....	55
<i>Tab. 21. Výsledky měření pro PE-DOW-20°</i> .....	56
<i>Tab. 22. Výsledky měření pro PE-DOW-60°</i> .....	57
<i>Tab. 23. Výsledky měření pro PE-DOW-100°</i> .....	58
<i>Tab. 24. Výsledky měření pro PBT-neozářený</i> .....	59
<i>Tab. 25. Výsledky měření pro Polystyren</i> .....	60
<i>Tab. 26. Výsledky měření pro PA 6-neplněný</i> .....	61
<i>Tab. 27. Výsledky měření pro TPE</i> .....	62
<i>Tab. 28. Výsledky měření pro HDPE</i> .....	63
<i>Tab. 29. Výsledky měření metodou SHORE A</i> .....	64
<i>Tab. 30. Výsledky měření metodou SHORE D</i> .....	66
<i>Tab. 31. Výsledky měření metodou BIM H5/132</i> .....	68
<i>Tab. 32. Výsledky měření metodou BIM H5/358</i> .....	70