

Vliv množství Polybutenu na mikrotvrdost PP

Petr Šmach

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr ŠMACH**
Osobní číslo: **T09480**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv množství polybutenu na mikrotvrdotost PP**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární studie na dané téma**
- 2. Příprava zkušebních teles 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:

doc. Ing. David Maňas, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

13. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

18. května 2012

Ve Zlíně dne 8. února 2012



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním 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 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 jsem seznámen s tím, že na moji 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 – 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 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 bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem 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 20. 5. 2017

.....
Šmach

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

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

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

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

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

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

Tato bakalářská práce se zabývá měřením mikrotvrdosti polymerů. V teoretické části se zaměřuje na vlastnosti, zpracování a použití vybraných polymerů. Popisuje také různé metody zkoušek tvrdosti a mikrotvrdosti.

V praktické části jsou zpracovány a následně vyhodnoceny naměřené hodnoty. Zkoumá se zde vliv množství polybutenu na mikrotvrdost polypropylenu.

Klíčová slova: polypropylen, polybuten, tvrdost, mikrotvrdost

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with measuring microhardness of polymers. In theoretical part it focuses on properties, manufacturing and uses of selected polymers. It also describes different methods of hardness and microhardness tests.

In practical part measured values are processed and evaluated. We examine the influence of quantity of polybutene on microhardness of polypropylene.

Keywords: polypropylene, polybutene, hardness, microhardness

V této části bych rád poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. za jeho odborné znalosti a především za čas, který ochotně obětoval při spolupráci na tvorbě této bakalářské práci.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY (MAKROMOLEKULÁRNÍ LÁTKY)	12
1.1 HISTORIE POLYMERŮ.....	12
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.3 VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	13
1.4 SYNTÉZA POLYMERŮ.....	14
1.5 POLYPROPYLEN (PP).....	15
1.5.1 Historie polypropylenu.....	15
1.5.2 Stereochemická struktura polypropylenu.....	15
1.5.3 Vlastnosti polypropylenu	16
1.5.4 Zpracování polypropylenu	17
1.5.5 Použití polypropylenu	17
1.6 POLYBUTEN (PB)	19
1.6.1 Vlastnosti polybutenu.....	19
2 TVRDOST	21
2.1 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	21
2.1.1 Historie zkoušek tvrdosti.....	21
2.1.2 Rozdělení zkoušek tvrdosti	22
2.1.3 Zkouška tvrdosti podle Brinella	23
2.1.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	25
2.1.5 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	26
2.1.6 Poldi kladívko	27
2.1.7 Baumannovo kladívko	28
2.1.8 Shoreho skleroskop	28
2.1.9 Duroskop	29
3 MIKROTVRDOST	30
3.1 ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI PODLE VICKERSE	30
3.2 ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI PODLE KNOOPA.....	31
3.3 ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI PODLE BREKOVIČE.....	32
3.4 MIKROTVRDOMĚRY.....	33
3.4.1 Hannemanův mikrotvrdoměr	33
3.4.2 Bergsmannův mikrotvrdoměr	34
3.4.3 Girschingův mikrotvrdoměr.....	34
3.4.4 Mikrotvrdoměr PMT – 3	35
3.4.5 Mikrotvrdoměr Durimet.....	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
4 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	39
5 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	40
6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	41
7 ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI	42
8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI	43

8.1	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI PŘI VELIKOSTI ZATÍŽENÍ 0,5N	43
8.2	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI PŘI VELIKOSTI ZATÍŽENÍ 1N	47
8.3	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI PŘI VELIKOSTI ZATÍŽENÍ 5N	50
8.4	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI U VYBRANÉ SMĚSI PP+PB25% A ČISTÉHO PP PŘI ZVOLENÉM ZATÍŽENÍ 1N.....	54
9	DISKUSE VÝSLEDKŮ	59
	ZÁVĚR	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	61
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	63
	SEZNAM OBRÁZKŮ	65

ÚVOD

Polymery jsou molekulové systémy složené z velkého počtu atomů vázaných chemickými vazbami do dlouhých řetězců. Tyto látky byly poprvé vyvinuty v 19. století a dnes na ně můžeme narazit prakticky ve všech oborech lidské činnosti

Za velmi rychlým a všestranným rozšířením výroby a zpracování polymerů stojí skutečnost, že polymerní materiály mohou jednak nahrazovat klasické materiály (sklo, dřevo, kovy aj.) a na druhou stranu umožňují úplně nové aplikace a řešení materiálových problémů.

Tvrdoost případně mikroostvrdoost řadíme mezi významné mechanické vlastnosti materiálů. Můžeme ji definovat jako odpor proti vniknutí cizího tělesa do povrchu zkoušeného materiálu. K hlavním přednostem zkoušek tvrdosti řadíme jejich relativní jednoduost, opakovatelnost a velmi podstatná je také skutečnost, že v mnoha případech lze měření provádět přímo na výrobku, aniž by došlo k jeho deformaci nebo znehodnocení. Pro zkoušení tvrdosti se využívá velkého množství různých přístrojů a metod, jejich rozdělení a vlastnostem se budu věnovat v teoretické části této bakalářské práce.

V praktické části budeme zkoumat vliv množství polybutenu na mikroostvrdoost polypropyleny, a to pomocí metody DSI (Depth Sensing Indentation) neboli Instrumentované vnikající zkoušky tvrdosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY (MAKROMOLEKULÁRNÍ LÁTKY)

Makromolekuly jsou molekulové systémy složené z velkého počtu atomů vázaných chemickými vazbami do dlouhých řetězců. Tyto řetězce tvoří pravidelně se opakující části, které nazýváme stavební nebo monomerní jednotky (mery). Počet stavebních jednotek udává polymerační stupeň n ; mívá hodnotu 10 až 10^6 . Sloučeniny s nízkým polymeračním stupněm ($n < 10$) se nazývají oligomery, s vyšším polymeračním stupněm ($n > 10$) jsou polymery. Polymery biologického původu se nazývají biopolymery nebo biomakromolekulární látky. [1]

1.1 Historie polymerů

Již dlouho se snažíme vyvíjet umělé materiály, jenž by měly lepší vlastnosti než látky, které se běžně vyskytují v přírodě. Umělé hmoty (plasty) byli vyvinuty už v 19. století a v dnešní době se s nimi běžně setkáváme a jsou používány téměř ve všech oborech lidské činnosti.

První plast - nitrát celulózy objevil Alexandr Parkes a poprvé ho představil veřejnosti na velké výstavě v Londýně roku 1862. Z tohoto materiálu byly vyrobeny biliárové koule a podešve bot. John W. Hyatt ještě vylepšil vlastnosti nitrátu celulózy a to smícháním s kafrem a nazval tento nový produkt celuloid. Tento nový plast se používal k výrobě rukojetí, hřebenů nebo knoflíků.

Nové polymerní materiály představovaly modifikované přírodní látky, z nichž nejznámější je viskózní vlákno. Tato látka je vlastně polo-přírodní polymer vyráběný z celulózy, používá se v textilním průmyslu a známe ho také pod názvem celofán (transparentní film). Úplně první čistě syntetický plast byl bakelit, který vynalezl Leo Baekelondem v Americe v roce 1909. Tento plast se vyráběl z fenolu a formaldehydu a vyznačoval se vysokou pevností, tepelnou odolností a lehkostí. Pro své dobré izolační vlastnosti se dlouhá léta používal v elektrotechnice.

Vývoj polymerních látek pokračoval ve 20. a 30. letech a hojně se využívaly během 2. Světové války. Na začátku 50. let si plasty našly cestu také do našich domácností. Od té doby se jejich výroba a spotřeba několikanásobně zvýšila. [2]

1.2 Rozdělení polymerů

Polymerní materiály se dělí do tří skupin:

- a) Termoplasty
- b) Reaktoplasty (termosety, pryskyřice)
- c) Elastomery (kaučuky)

Termoplasty jsou polymerní materiály, které za zvýšených teplot měknou a přecházejí do plastického stavu a za těchto podmínek je můžeme tvarovat. Zástupci termoplastů jsou polyetylen, polyvinylchlorid, polypropylen, polystyren aj.

Reaktoplasty se chovají odlišně. Při zahřátí polotovaru, který má tvar budoucího výrobku dojde k jeho vytvrzení a změně struktury (zesíťování), která je nevratná. Výsledkem je tuhý a tvrdý materiál, který při opětovném zahřátí neměkne ani se netaví. Mezi reaktoplasty patří: epoxidové pryskyřice, polyesterové pryskyřice, fenolformaldehydové pryskyřice (bakelit).

Elastomery (kaučuky) jsou materiály schopné velké deformace při mechanickém zatížení. Tato deformace je elastická (pružná), což znamená, že po odlehčení se materiál vrací do původního tvaru. Zástupci elastomerů jsou kaučuky např. styrenbutadienový kaučuk nebo izoprenový kaučuk. [3]

1.3 Vlastnosti polymerů

Neobyčejně rychlé a všestranné rozšíření výroby a zpracování polymerů má několik hlavních příčin:

- mohou jednak nahrazovat klasické materiály (kovy, keramiku, sklo, dřevo, kůži, vlnu, přírodní kaučuk aj.), jednak mohou mít zcela odlišné vlastnosti od těchto klasických surovin, tím pádem umožňují úplně nové aplikace a nová řešení materiálových problémů,
- řada polymerů se vyrábí z relativně levných a dostupných surovin, a může tedy nahradit nedostatkové a ekonomicky náročné materiály,
- polymery můžeme velmi snadno zpracovávat tvářením z taveniny nebo roztoku, a proto umožňují rychlou a relativně levnou výrobu předmětů hromadné potřeby,
- polymery mají nízkou hustotu, často dobré elektroizolační vlastnosti a relativně vysokou odolnost proti korozi.

Ovšem i u polymerů, jakožto u všech materiálů, existuje vedle výhod i několik zásadních nedostatků, mezi které patří především:

- použitelnost je omezena teplotou a tvarovou neformovatelností,
- vznikají potíže s regenerací odpadu,
- polymery mají sklon k elektrostatickému nabíjení,
- oprava výrobků bývá velmi obtížná,
- polymery mají zpravidla nízkou hustotu [4]

1.4 Syntéza polymerů

Syntetické polymery vznikají třemi základními typy chemických reakcí:

- Polymerací
- Polykondenzací
- Polyadicí

Polymerace je řetězová chemická reakce velkého počtu molekul monomeru, při níž vznikají dlouhé makromolekuly polymeru. Při této reakci se nevytvářejí vedlejší produkty, chemické složení polymeru je stejné jako chemické složení monomeru. Produktem polymerace je makromolekulární řetězec, který narůstá do své konečné délky ve velmi krátké době, takže v každém stádiu polymerace existují v reakční hmotě vedle sebe nezreagované molekuly monomeru a makromolekuly polymeru ve své konečné velikosti.

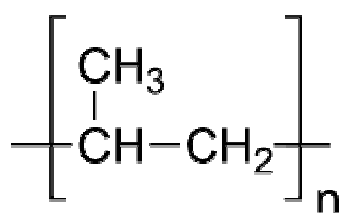
Polykondenzace je sled stejných opakujících se reakcí funkčních skupin výchozích látek. Ke vzniku polymeru je potřeba, aby výchozí sloučeniny měly potřebný počet funkčních skupin, a to nejméně dvě v každé molekule vzájemně reagující komponenty. Polykondenzace je tedy reakce, při níž vzniká ze dvou nízkomolekulárních látek polymer a nějaká jiná nízkomolekulární látka, většinou voda.

Polyadice - sloučeniny, jejichž molekuly obsahují násobné vazby, nebo jsou tvořeny kruhy s malým počtem členů, mohou být mimo vzájemné spojování (řetězení) schopny adičních reakcí se sloučeninami, jejichž molekuly obsahují vhodné funkční skupiny. Mají-li tyto sloučeniny ve svých skupinách alespoň dvě funkční skupiny, může mnohonásobnou adicí vzniknout polymer; takové reakci proto říkáme polyadice. Složení konečného produktu se

neliší od složení výchozí směsi. Na rozdíl od polymerace však poskytuje polyadice strukturu základního článku produktu odlišnou od struktury výchozích látek. [5]

1.5 Polypropylen (PP)

Polypropylen je termoplastický polymer ze skupiny polyolefinů, které patří mezi nejběžnější plasty, používá se v mnoha odvětvích potravinářského a textilního průmyslu a v laboratorních vybaveních. Prodává se pod obchodním názvem Triplen, Tatren nebo Mosten. [6]



Obr. 1. Strukturální vzorec polypropylenu

1.5.1 Historie polypropylenu

Radikálovou nebo kationovou polymerací propylenu se získávají jen nízkomolekulární produkty, sestávající z rozvětvených, ataktických molekul. Teprve v roce 1954 zjistil Giulio Natta, že některé katalyzátory Zieglerova typu jsou schopny polymerovat propylen na vysokomolekulární vysoce krystalický izotaktický polypropylen. [4]

Dnešní výroba polypropylenu se podobá výrobě polyethylenu nízkotlakým způsobem. Výtěžek izotaktického polypropylenu je vždy vyšší než 90 %, pro zvláknování se však požaduje tzv. index izotakticity vyšší než 95 %. Ataktický podíl, zhoršující mechanické vlastnosti polypropylenu, lze vyprat alifatickými uhlovodíky, např. hexanem. Stále se zlepšující katalytické systémy poskytují stále vyšší výtěžky izotaktického polymeru. [5]

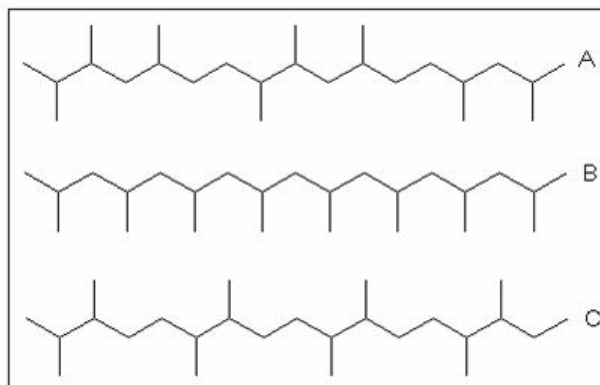
1.5.2 Stereochemická struktura polypropylenu

Stereochemickou strukturou polypropylenu můžeme definovat jako uspořádání atomů v molekule.

Ataktický polypropylen má nepravidelně uspořádané methylskupiny obr. 2A.

Izotaktický polypropylen má všechny methylskupiny na jedné straně uhlíkového řetězce obr. 2B.

Syndiotaktický polypropylen má methylskupiny uspořádány střídavě obr. 2C. [4]



Obr. 2. Stereochemická struktura polypropylenu [7]

Stereoregularita polypropylenu (pravidelnost umístění methylových skupin) se zpravidla určuje na základě nerozpustnosti izotaktického polypropylenu ve vroucím heptanu. Ataktický PP a stereoblokový PP (s ataktickými a izotaktickými segmenty řetězce) jsou totiž ve vroucím heptanu rozpustné. [4]

1.5.3 Vlastnosti polypropylenu

Polypropylen je krystalický polymer o stupni krystalinity 60 až 75 %. Vzhledem ke své krystalinitě je neprůhledný. Izotaktický podíl obchodních typů bývá 94 až 98 %. Teplota tání čistého izotaktického PP je 176°C. Teplota tání obchodních produktů bývá 160 až 170°C. PP má relativně nízkou hustotu, která se pohybuje v rozmezí 900 až 920 kg/m³. Podobně jako PE má i PP v podstatě nepolární strukturu, tím pádem vykazuje vynikající elektroizolační vlastnosti v širokém rozsahu frekvencí. Také jeho chemická odolnost je podobná jako u PE. Bobtná v esterech, ketonech a uhlovodících. Rozpouští se v chlorovaných a aromatických uhlovodících při teplotě 90°C.

I když je PP podobný jako HDPE, liší se od něho především v těchto vlastnostech:

- má nižší hustotu než HDPE,
- má vyšší teplotu měknutí (a tím pádem má větší použitelnost pro vyšší teploty).
- má lepší odolnost vůči korozi za napětí (praskání),
- má vyšší pevnost v tahu a v tlaku, vyšší tvrdost a vyšší odolnost proti oděru,
- je křehký při teplotách pod 0 °C (proto je vhodný pro aplikace za teplot nad 10 °C),
- má vyšší citlivost vůči oxidaci, zejména na povětrnosti,
- má menší propustnost pro plyny a páry.

Vlastnosti PP jsou závislé především na jeho izotakticitě, molekulové hmotnosti a stupni polydisperzity. PP má ve srovnání s PE podstatně nižší odolnost na povětrnosti. U nestabilizovaného vzorku dochází již po několika týdnech na slunci ke křehnutí a praskání. Fólie o tloušťce 0,5 mm, pokud nejsou stabilizovány, mají po měsíci vystavení povětrnosti nulovou pevnost v tahu. PP se také obtížněji stabilizuje než PE. Životnost PP stabilizovaného absorberů UV-zářením v kombinaci s antioxidanty na slunci není ani 5 let. Nejlepší ochranou proti atmosférickému stárnutí je přídavek sazí (přídavek 2,5 % zajistí životnost na povětrnosti přes 6 let).

PP má značně menší sklon ke korozi pod napětím než ostatní polyolefiny, má vyšší tvrdost a pevnost v ohybu, ale nižší rázovou houževnatost než HDPE. Krystalická struktura PP se dá významně ovlivnit podmínkami při zpracování. Velmi rychlým ochlazením taveniny PP lze získat vysoce transparentní tenkostěnné výrobky (fólie). Rychlým ochlazením vznikají sférolity o velmi malých průměrech a rozdíl indexu lomu krystalické a amorfní fáze je malý. S přibývajícím průměrem sférolitů klesá rázová houževnatost a stoupá tuhost. Zvýšení houževnatosti, transparence a flexibility lze tedy dosáhnout snížením stupně krystalinity. Příkladem takového snížení krystalinity jsou statické kopolymery propylenu s etylenem o obsahu etylenu do 5 %. Podstatný pokles teploty křehnutí pozorujeme u blokových kopolymerů. [4]

1.5.4 Zpracování polypropylenu

PP se zpracovává vstřikováním při teplotě 205 až 280 °C a vytlačováním na trubky, desky, fólie a profily při teplotě 200 až 270 °C. Tavný index se podle typu pohybuje mezi 0,4 až 13 g za 10 min. Desky a trubky se spojují svařováním polypropylenovým drátem (pistolí pro svařování horkým plynem o teplotě 200 až 220 °C). Fólie podobně jako u PE, lze svařovat sálavým teplem nebo tepelným impulsem. [4]

1.5.5 Použití polypropylenu

PP lze používat na různé výrobky, u nichž jsou žádány tuhost, mechanická pevnost a dobré elektroizolační vlastnosti. V automobilovém průmyslu se např. uplatňují vstřikované dílce z PP na přístrojové desky nebo ventilátory. Ve spotřebním průmyslu se PP uplatňuje jako součásti vysavačů, ventilátorů, sušičů na vlasy, mixérů, hraček nebo kufrů. Odolnost vůči sterilizačním teplotám umožňuje použít polypropylen na dílce injekčních stříkaček aj.

Trubky mají dobrou chemickou odolnost a jsou vhodné např. pro kanalizační odpady v chemickém průmyslu. Fólie, zejména dvousměrně orientované, mohou v obalové technice konkurovat celofánu. Používají se pro balení potravin (těstovin, bonbónů, mastných produktů) a pro výrobu varných sáčků. Stále významnější, i když náročná je aplikace polypropylenu pro výrobu kondenzátorů. Zavádějí se i zpenovatelné typy PP pro strukturně lehčené dílce.

Široká je aplikace PP i při výrobě textilních vláken. Polypropylenová vlákna mají mechanické pevnosti srovnatelné s vlákny polyamidovými, jsou elastická a schopná absorbovat deformační energii. Odolávají kyselinám i zásadám. Vzhledem ke své nepolární struktuře se špatně barví. PP se zvláknuje z taveniny, zvlákněný polymer se pak dluží o 400 až 800 % a pak se stabilizuje (např. zahříváním na 100 °C).

Polypropylenová stříž se používá do potahových látek, koberců, všívaných a vpichovaných podlahovin, dekoračních látek a technických tkanin. Polypropylenové hedvábí slouží pro výrobu pletenin pro spodní i vrchní ošacení, ponožek a punčoch.

Amorfní PP, který odpadá při výrobě, je surovinou pro výrobu chlorovaného polypropylenu, přidává se do různých lepidel i do živičných vozovek pro zvýšení kvality a je pojivem pro izolační rohože.

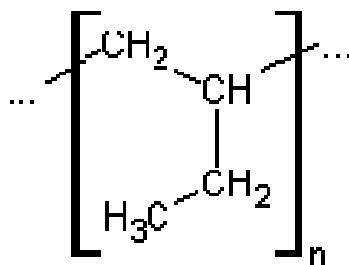
Kopolymery propylenu s etylenem získávají s ohledem na lepší mechanické vlastnosti stále větší technický význam. V roce 1981 dosáhla produkce statistických a blokových kopolymerů 20 až 30 % z celkové produkce PP. Do statistických kopolymerů nelze zabudovat více než 5 hmotn. % etylenových jednotek, zatímco blokové kopolymery obsahují 5 až 30 % polyetylenových bloků, respektive bloků ze statického kopolymeru etylen-propylenu. Tyto kopolymery mají zvýšenou rázovou houževnatost a sníženou T_b (až -50°C) a obsahují etylen-propylenové bloky s obsahem propylenových jednotek 20 až 50 %. Zvýšení houževnatosti za nižších teplot je dáno nesnášenlivostí chemicky rozdílných bloků polymerních řetězců, takže se z etylen-propylenových kopolymerních bloků vytváří disperzní měkká fáze.

Statické kopolymery propylenu s 1-butenem nemají význam, neboť v nich dochází při stejném obsahu komonomeru k podstatně nižšímu poklesu stupně krystalinity než u etylenu (1-butenové jednotky se totiž zabudovávají do polypropylenových krystalitů).

Houževnatosti za chladu lze dosáhnout také mísením PP s kaučuky EPM nebo EPDM. Takové polymery mají vícefázovou strukturu, přičemž ve spojitě polypropylenové fázi jsou rozptýleny kaučukové částice o velikosti do 5 μm . [4]

1.6 Polybuten (PB)

Poly-1-buten patří k relativně novým typům plastů. Výroba PB pod označením Vestolen BT byla zavedena v roce 1960 v SRN. Polymerace probíhá v rozpouštědle za přítomnosti Zieglerových-Nattových katalyzátorů. Vzniká převážně izotaktický polymer. Podobně jako u PP se také zde odstraňuje ataktický podíl a katalyzátor se rozkládá. I další zpracování je obdobné jako u PP. Obchodní PB má velmi vysokou molekulovou hmotnost ($M_w=770000$ až 3000000 , což je desetinásobek hodnoty pro HDPE). [4]



Obr. 3. Strukturální vzorec polybutenu [8]

1.6.1 Vlastnosti polybutenu

Mimořádně vysoká molekulová hmotnost ve spojení s krystalinitou je příčinou mimořádné odolnosti poly-1-butenu proti korozi za napětí a tečení. To umožňuje ve srovnání s PE a PP zmenšit tloušťku stěn trubek z tohoto materiálu. Filmy z PB mají vysokou odolnost proti přetržení (PB je houževnatější než PP, pod teplotou 0 $^{\circ}\text{C}$ je však méně houževnatý než PE). Pod zatížením odolává dlouhodobě asi do 93 $^{\circ}\text{C}$. Chemické odolnosti a elektroizolační vlastnosti jsou podobné jako u ostatních polyolefinů.

PB snese větší plnění než PE a PP, aniž by došlo k jeho křehnutí. Je snášenlivý s PP ve všech poměrech, snášenlivost s PE má omezenou. Zpracovává se obdobně jako ostatní polyolefiny v rozmezí teplot 190 až 280 $^{\circ}\text{C}$. Používá se pro výrobu trubek a fólií na těžké pytle. Ve světě se předpokládá rychlý růst jeho výroby a spotřeby.

PB je výjimečný v tom, že existuje ve třech krystalických formách. První forma (tetragonální) vzniká přímo ochlazením taveniny, ale je nestabilní a při skladování přechází za 3 až 10 dnů do stabilní (rombické) formy. Třetí forma vzniká při krystalizaci z roztoku. Změ-

nami při skladování se také mění hustota a bod tání z původních 890 kg/m^3 a $124 \text{ }^\circ\text{C}$ na 915 kg/m^3 a $135 \text{ }^\circ\text{C}$. Po 10 dnech skladování bývá stupeň krystalinity kolem 50 %.[4]

2 TVRDOST

Tvrdot řadíme mezi významné mechanické vlastnosti materiálů a velmi často ji využíváme v technické praxi. Mezi hlavní přednostmi zkoušek tvrdosti patří jejich relativní jednoduchost, opakovatelnost a v neposlední řadě také to, že v mnoha případech můžeme provádět měření buď přímo na výrobku a jeho polotovarech bez jejich deformace a znehodnocení nebo na zkušebních tělesech, které jsou určeny pro jiné druhy mechanických zkoušek. Z tohoto důvodu patří zkoušky tvrdosti mezi provozně i laboratorně nejvíce používané mechanické zkoušky. [9,10]

Tvrdot můžeme definovat jako odpor proti vniknutí cizího tělesa do povrchu zkoušeného materiálu. Posuzujeme ji podle velikosti stopy, která vznikne vtlačováním vhodného tělesa (kulička, kužel nebo jehlan), které je z dostatečně tvrdého materiálu, do zkoušeného vzorku určitou silou za předem definovaných podmínek. [10]

Tvrdot posuzujeme z velikosti trvalé deformace (vtisku), kterou vtlačované cizí těleso v povrchu zkoušeného vzorku zanechá. Těleso (indentor), které vniká do zkoušeného vzorku, musí vykazovat vysokou tvrdost, Youngův modul a mez pevnosti, aby nepodléhalo plastickým deformacím. Nečastěji se jako materiál indentoru volí diamant. Vzhledem k tomu, že při měření tvrdosti dochází k vícerému namáhání měřeného vzorku, jsou výsledné hodnoty tvrdosti ovlivněny velkým množstvím faktorů a výsledná tvrdost je tak ovlivněna komplexem mechanických a fyzikálních vlastností; například záleží na:

- elastických vlastnostech zkoušeného materiálu, především na modulu pružnosti ve smyku a tahu;
- plastických vlastnostech zkoušeného materiálu, zejména na mezi kluzu a míře formačního zpevnění zkoumaného materiálu;
- velikosti zatěžující síly a rychlosti, kterou indentor vniká do měřeného vzorku.[11]

2.1 Zkoušky tvrdosti

2.1.1 Historie zkoušek tvrdosti

Asi nejstarší způsob zkušební tvrdosti datujeme do roku 1722. Tehdy Reamur realizoval zkoušku pomocí tyče s proměnlivou tvrdostí od jednoho konce k druhému, kdy hodnota tvrdosti byla určována podle polohy vrypu, kterou zkoušený materiál na měrné tyči zanechal. Dalším pokrokem ve vývoji měření tvrdosti byla v roce 1822 známá Mohsova stupni-

ce relativní povrchové tvrdosti, která zahrnovala deset minerálů, v rozsahu od 1 do 10. Autorem vrypové zkoušky je Martens. Tato metoda spočívala v tažení diamantového hrotu (s vrcholovým úhlem 90°) po vyleštěném povrchu zkušební vzorku a následném měření šířky vrypu. Číslem tvrdosti bylo aplikované zatížení, které na povrchu vzorku vytvořilo vryp široký 0,1 mm. Velkou výhodou byla možnost využít jediného záznamu k měření relativní tvrdosti různých fází a složek obsažených v mikrostruktuře včetně změn tvrdosti na hranicích zrn. Měření tvrdosti se postupně rozvíjeno až do dnešní doby, kdy jsme schopni hodnotit tvrdost pomocí přesně daných podmínek měření. [9]



Obr. 4. Mohsova stupnice relativní povrchové tvrdosti [12]

2.1.2 Rozdělení zkoušek tvrdosti

Zkoušky tvrdosti dělíme dle použitého principu měření na:

- **Vrypové** - tvrdým hrotem, obvykle diamantovým, se při malém zatížení vytvoří na broušeném povrchu zkoušeného materiálu rýha resp. vryp a podle šířky tohoto vrypu se následně určí tvrdost měřeného materiálu.
- **Odrazové** - při této zkoušce se tvrdost měří podle velikosti odrazu závaží, které obsahuje kulovitě vybroušený diamantovým hrot. Toto závaží dopadá z určité výšky na zkoušený předmět.

- **Vtiskové** – tyto zkoušky jsou nejběžnější a také nejrozšířenější. Tvrdost se určuje z velikosti povrchu vtisku, způsobeného vnikajícím tělískem. [11]

Další rozdělení zkoušek tvrdosti bývá obvykle podle způsobu zatěžování (statické nebo dynamické) a podle typu deformace zkoušeného povrchu (elastické nebo plastické):

- **Staticko-plastické:**
 - Brinell
 - Vickers
 - Rockwell
- **Dynamicko-plastické:**
 - Poldi kladívko
 - Baumannovo kladívko
- **Dynamicko-elastické:**
 - Shoreho skleroskop
 - Duroskop [13]

2.1.3 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Na druhém mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálu v Paříži v roce 1900 předložil švédský inženýr Brinell svoji metodu určování tvrdosti, která se velmi rychle rozšířila a je dnes ve všech průmyslových státech normována (ČSN 42 0371). [14]

Tuto zkoušku realizujeme vtláčováním ocelové kalené kuličky o průměru D do zkušební tělesa silou F , která směřuje kolmo k povrchu zkušební tělesa po určitou dobu. Po odlehčení změříme průměr zanechaného vtisku d .

Průměr D bývá 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Tento průměr volíme v závislosti na tloušťce t měřeného materiálu. Platí zde, že minimální tloušťka materiálu je desetinásobek hloubky vtisku. V opačném případě by se mohla projevit tvrdost podložky. [15]

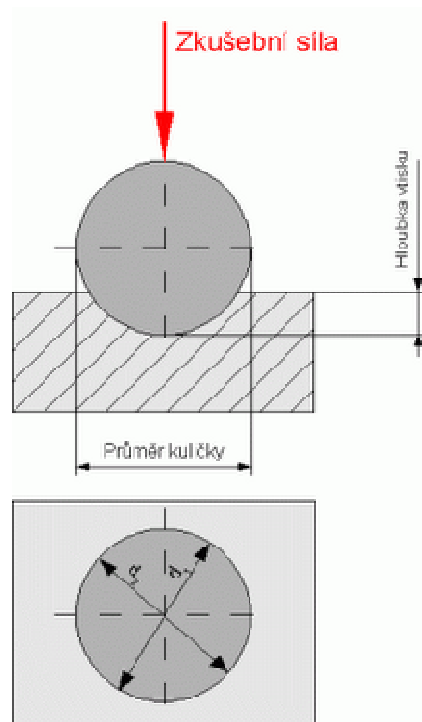
Tvrдост se pak stanovuje poměrem zatížení k ploše otláčku vztahem:

$$\text{---} \quad (1)$$

kde F je zatěžující síla [N],

A – plocha otláčku [mm^2].

Při vlačování kuličky do povrchu zkoušeného materiálu nastává v místě styku deformace. Tato deformace závisí na pružných a tvárných vlastnostech materiálu a na jeho schopnostech plastického toku a zpevnování. Průměr otláčku d se měří vhodným měřicím přístrojem ve dvou na sebe kolmých směrech. Rozdíl mezi oběma naměřenými hodnotami nesmí překročit 5%. Při měření musíme dodržovat zásadu, že povrch zkoušeného předmětu musí být rovný, hladký a bez nečistot. [3]



Obr. 5. Zkouška tvrdosti podle Brinella [16]

2.1.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

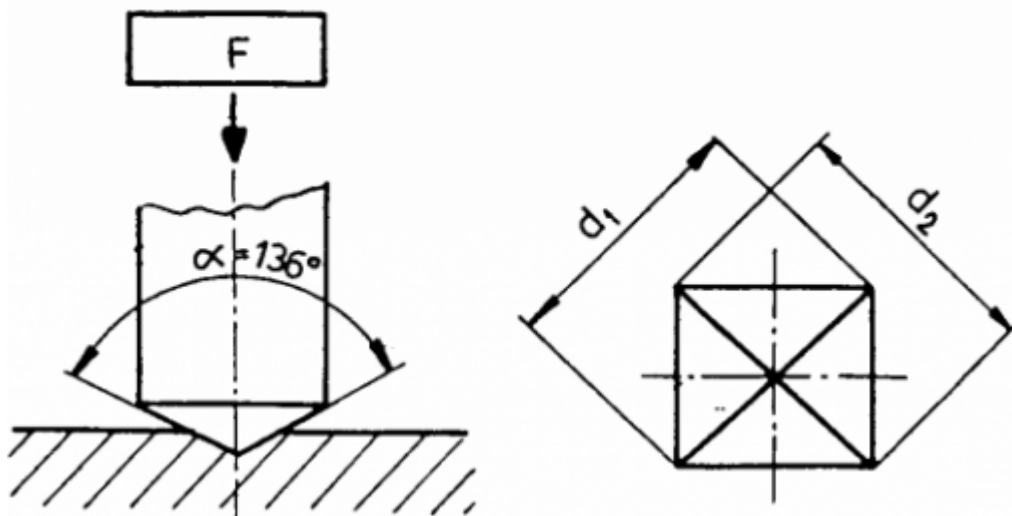
Ve stejné době jako v Americe vznikla Rockwellova metoda, vznikla v Anglii jiná vnikací zkouška, kterou popsali Smith a Sandland. V Evropě je tato zkouška známa podle tvrdoměru firmy Vickers. V USA je obvykle označována diamond pyramid hardness test. Tato zkouška je stejně jako zkouška podle Brinella normována (ČSN 42 0374).

Indentorem (vnikajícím tělesem) je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn α 136° , takže vznikají pravidelné čtyřhranné vtisky. Tento úhel je volen tak, aby tření co nejméně ovlivňovalo výsledek a dále proto, aby se hodnoty tvrdosti příliš neodlišovaly od tvrdosti stanovené metodou dle Brinella. Po provedení vtisku se měří jeho úhlopříčka. Její hodnota je pak dosazena do vztahu:

$$HV = 0,102 \frac{2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2} \quad (2)$$

kde F je zátěžná síla [N],

d – průměrná hodnota úhlopříčky [mm] [3,14]



Obr. 6. Zkouška tvrdosti podle Vickerse [17]

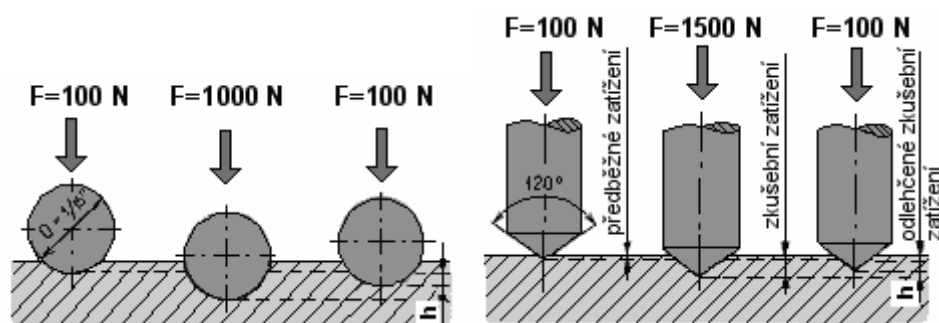
2.1.5 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Tato zkouška je také normována (ČSN 42 0373) a tvrdost se zjišťuje jako rozdíl hloubky vtisku vnikajícího tělesa (diamantového kuželu nebo ocelové kuličky) mezi dvěma stupni zatížení (předběžného a celkového). Předběžné zatížení má za úkol vyloučit z měřené hloubky nepřesnosti povrchových ploch. Diamantový kužel má vrcholový úhel 120° a poloměr kulové části 0,2 mm. Kulička má průměr 1,5875 mm.

Ocelová kulička nebo diamantový kužel, dotýkající se povrchu zkoušeného předmětu, se nejprve zatěžuje předběžnou silou 100 N (výchozí poloha pro měření hloubky vtisku). Následně se pozvolna zvětšuje zatěžovací síla tak, aby se dosáhlo zatížení předepsané normou (např. předběžné zatížení silou 100 N + zkušební zatížení silou 1400 N = celkové zatížení silou 1500 N). Nakonec se zatěžující síla opět zmenšuje až na velikost předběžného zatížení a v tomto stavu se zjistí přírůstek hloubky vtisku, který nastal proti výchozí poloze při témže předběžném zatížení. Tato zkouška tvrdosti je rychlá, snadná a vpichy (důlky) jsou velmi malé (max. hloubka 0,2 mm). Je vhodná pro běžnou kontrolu velkých sérií výrobků a také tam, kde zkouška podle Brinella již není použitelná.

U nás máme normalizovány tři druhy zkoušek tvrdosti podle Rockwella. Tvrdost naměřenou při těchto zkouškách označujeme **HRA**, **HRB**, **HRC**. Volba Rockwellovy stupnice (tj. druhu vnikacího tělíska) závisí hlavně na předpokládané tvrdosti zkoušeného materiálu.

- **HRA** – Zkouška realizovaná diamantovým kuželem při celkovém zatížení 600 N. Využívá se pro slinuté karbidy a tenké povrchové vrstvy.
- **HRB** - Tvrdost určená pomocí ocelové kuličky při celkovém zatížení 1000 N. Využívá se pro měkkší kovy (25 - 100 HRB).
- **HRC** - Tvrdost určená diamantovým kuželem při celkovém zatížení 1500 N. Doporučuje se používat pro rozsah HRC = 20 - 67. [15]



Obr. 7. Zkouška tvrdosti podle Rockwella

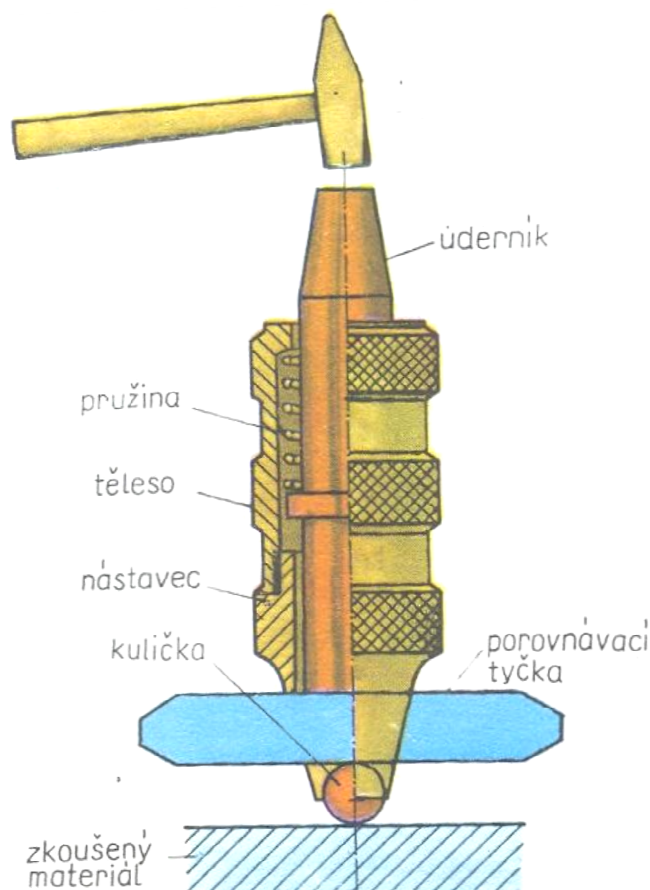
2.1.6 Poldi kladívko

Je to mobilní tvrdoměrné zařízení používané často ve výrobních procesech. Součástí kladívka je etalonová tyč vyrobená z materiálu o stanovené tvrdosti.

Úderem dílenského kladiva do Poldi kladívka dojde k současnému vtlačení vnikajícího tělesa ve tvaru kuličky do povrchu zkušebního tělesa a zároveň i do etalonu. Měří se průměry vtisku, které zůstanou na povrchu zkušebního materiálu a etalonu.

Vnikací tělísko je ocelová kalená kulička $\varnothing D = 10$ mm. Zatížení je vyvoláno ručně úderem dílenského kladiva na razník Poldi kladívka. Vliv různé síly nárazu (a tím i různě velkého vtisku) je eliminován přítomností etalonu.

Tvrdost materiálu je určena pomocí hodnot průměrů vtisku, které zůstanou ve zkušebním materiálu a v etalonu, z tabulek. [13]



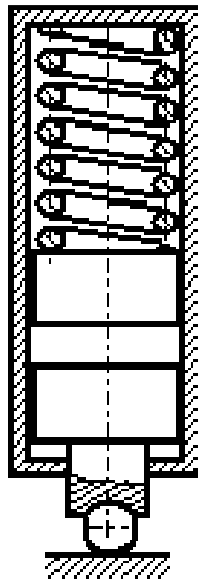
Obr. 8. Poldi kladívko [18]

2.1.7 Baumannovo kladívko

Je stejně jako Poldi kladívko mobilní tvrdoměrné zařízení. Odjištěním a spuštěním pružiny, která je součástí kladívka, dojde k úderu razníku na vnikající tělísko ve tvaru kuličky a k jeho vtlačení do povrchu zkušebního tělesa. Měří se průměr vtisku, který zůstane na povrchu zkušebního materiálu.

Tvrдость se určuje jako poměr zkušebního zatížení a povrchu vtisku. Vnikací tělísko je ocelová kalená kulička $\varnothing D = 10 \text{ mm}$.

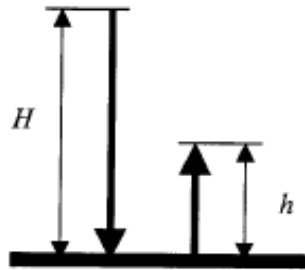
Zatížení je vyvoláno odjištěním pružiny a úderem razníku na vnikající tělísko. Síla nárazu je vždy stejná (vyvinutá silou pružiny), proto nemusí být součástí Baumannova kladívka etalon, jako je tomu u Poldi kladívka. [13]



Obr. 9. Baumannovo kladívko [19]

2.1.8 Shoreho skleroskop

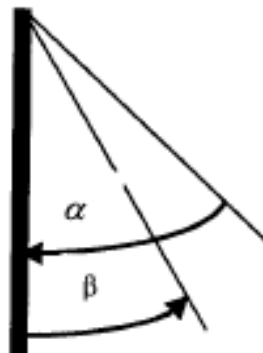
Tato zkouška tvrdosti spočívá ve spuštění definovaného zkušebního tělíska z výšky H na zkoušený materiál. Sleduje se výška h , do níž zkušební tělísko po dopadu odskočí. Vzhledem k tomu, že zkouška je založena na elastické deformaci zkoušeného povrchu, nemohou být na tělese patrné viditelné stopy deformace. Při určování tvrdosti materiálu se změří výška odskoku zkušebního tělíska h ; někdy bývá měřítko odskoku kalibrováno přímo v jednotkách tvrdosti. [13]



Obr. 10. Princip Shoreho skleroskopu

2.1.9 Duroskop

Při této zkoušce dochází ke spuštění definovaného zkušebního tělíska z úhlu α na svislou stěnu zkoušeného materiálu. Sleduje se úhel β , do něhož zkušební tělísko po dopadu odskočí. Vzhledem k tomu, že zkouška je založena na elastické deformaci zkoušeného povrchu, nemohou být na tělese patrné viditelné stopy deformace. [13]



Obr. 11. Princip duroskopu

3 MIKROTVRDOST

Při měření mikrotvrdomosti jsou zkoušky realizovány vtlačováním diamantového tělesa tvaru Knoopova nebo Vickersova jehlanu do povrchu měřeného tělesa silami v rozsahu od 1g (0,09807 N) do 1000g (9,807 N), oproti běžným zkouškám (makro) tvrdosti podle Vickerse, které jsou prováděny při zatížení mezi 10 a 1200 N. První zkoušky mikrotvrdomosti byly provedeny v National Physical Laboratory ve velké Británii a datujeme je do roku 1932.

S klesajícím aplikovaným zatížením (se zmenšující se velikostí vtisku) při měření tvrdosti, přesnost měření klesá. Navíc s klesající zatěžující silou do oblasti mikrotvrdomosti už není Vickersova tvrdost (jako je tomu na základě geometrické podobnosti vtisků u hodnot makrotvrdomosti) nezávislá na velikosti aplikovaného zatížení.

Protože vtisky při zkoušce mikrotvrdomosti jsou velmi malé, je použití této metody vhodné pro:

- měření křehkých materiálů;
- měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušební vzorku;
- měření mikrotvrdomosti strukturních složek a fází;
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování;
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků;
- hodnocení svarových spojů;
- pro hodnocení oduhlčujících procesů;
- studium difúzních pochodů;
- malé nebo tenké součásti. [3]

3.1 Zkouška mikrotvrdomosti podle Vickerse

Princip, průběh a podstata zkoušek tvrdosti a mikrotvrdomosti nebo nanotvrdomosti se od sebe vzájemně nijak neliší. Hlavní rozdíl mezi zkouškami spočívá ve velikosti konečného zatížení, které působí na indentor. Zkoušku tvrdosti a mikrotvrdomosti dle Vickerse předepisuje evropská norma ČSN EN ISO 6507-1 pro tři různé oblasti zatížení. Hodnoty zatížení, udávané evropskou normou, jsou v kilogramech. Důvodem je historické hledisko, neboť zatížení pro tvrdost a z toho plynoucí jednotka tvrdosti, byla stanovena před přijetím mezinárodní soustavy jednotek SI. V současné době se uvažuje o revizi a výhodnosti udávat zatížení pro tvrdost v zaokrouhlených jednotkách síly, tedy v newtonech. Při měření tvrdosti se používá zatížení v kilogramech, ale zatěžující síla se udává v newtonech. Například

označení HV 10 znamená, že při zkoušce bylo použito zatížení 10 kg, ale maximální síla dosažená v průběhu zkoušky, která působila na indentor, byla 98,07 N.

Při zkoušce mikrotvrlosti podle Vickerse, je do měřeného vzorku vtlačován pravidelný čtyřboký jehlan (pyramida) vyrobený z diamantu. Osy protilehlých stěn jehlanu svírají úhel 136° a určují tak rozevření jehlanu. Vzhledem k tomu, že podstavu jehlanu tvoří čtverec, má půdorys vzniklého vtisku v materiálu tvar čtverce. Velikost tvrdosti je rovna jako podíl použité síly F a velikosti plochy vtisku A tj. plocha stěn nikoliv, projekční plocha. K určení tvrdosti se změří úhlopříčka vtisku d . [3]

Při měření tvrdosti při nízkém aplikovaném zatížení a při mikrotvrlosti musí být umožněno přesné měření úhlopříček vtisku. Zkušební vzorek musí mít hladký a rovný povrch bez okují, mazadel a cizích tělísek. Hodnocený vzorek se připravuje jako metalografický výbrus, tzn. nesmí dojít k deformačnímu nebo tepelnému ovlivnění povrchu. Příprava se provádí broušením za mokra a leštěním na diamantových pastách nebo také elektroleštěním. Přesná metodika přípravy vzorku se volí dle příslušného materiálu.

Zkušební těleso musí být ustaveno na tuhé podložce, tak aby během zkoušky bylo zabráněno jeho pohybu. Vnikající těleso (indentor) se vtlačuje do měřeného tělesa zkušebním zatížením, které musí směřovat kolmo k jeho povrchu. Doba od počátečního zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí být menší než 2 s a větší než 8 s. [20]

3.2 Zkouška mikrotvrlosti podle Knoop

Při této zkoušce vtlačujeme diamantový jehlan s kosočtverečnou základnou a s předepsanými úhly protilehlých stran do povrchu zkušební tělesa. Následně změříme delší úhlopříčku vtisku, která zůstane po odlehčení aplikovaného zatížení.

Tvrdot dle Knoop vyjádříme jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku, jenž se uvažuje jako jehlan s kosočtverečnou základnou a s vrcholovými úhly rovnající se úhlům vnikajícího tělesa:

$$HK = 0,102 \frac{F}{0,0782.L^2} \quad (3)$$

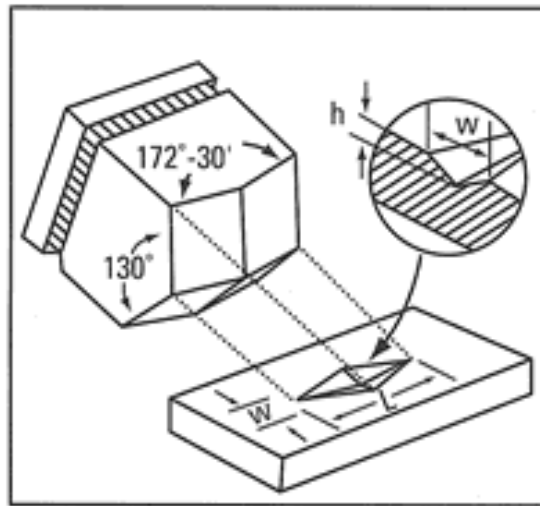
L ... délka delší úhlopříčky, v mm

F ... zkušební zatížení, v N

Stejně jako při měření mikrotvrlosti podle Vickerse musí být umožněno přesné měření delší úhlopříčky vtisku. Hodnocený zkušební vzorek musí mít taktéž hladký a rovný po-

vrch, bez okují, mazadel a cizích tělísek. Hodnocený vzorek se tedy připravuje jako metalografický výbrus, tzn. nesmí dojít k deformačnímu nebo tepelnému ovlivnění povrchu. Běžně se příprava provádí broušením za mokra a leštěním na diamantových pastách, případně elektroleštěním. Přesná metodika přípravy vzorku se volí dle příslušného materiálu.

Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce, tak aby se během zkoušky nepohnulo. Vnikající těleso (indentor) se zatačuje do zkušebního tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu. Doba od začátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí překročit 10 s. Rychlost přibližování vnikajícího tělesa musí být v rozmezí od 15 $\mu\text{m/s}$ do 70 μm . Doba plného zkušebního zatížení musí být v rozmezí 10 až 15 s. [20]



Obr. 12. Geometrie Knoopova indentoru [21]

3.3 Zkouška mikrotvrlosti podle Brekoviče

Pro tuto zkoušku se používá Berkovičův třístěnný indentor, který spatřil světlo světa roku 1951. Průběh a princip této zkoušky se od Vickersova testu nijak neliší. Hlavním důvodem používání nového indentoru byla složitost výroby čtyřbokého jehlanu a dodržení geometrické podmínky sbíhavosti hran Vickersova jehlanu, která v případě výroby třístěnného jehlanu odpadá. Jehlan je také díky svému tvaru během provozního namáhání méně citlivý na nárazy a neopatrné zacházení. Původní Berkovičův indentor byl navržen tak, aby byl stejný poměr plochy stěn jehlanu k jeho výšce. Tomu u třístěnného jehlanu odpovídá úhel 65,03° mezi bočními stěnami a výškou jehlanu.

Hodnota mikrotvrlosti pro Berkovičův indentor s úhlem $65,03^\circ$ je vyjádřena jako poměr velikosti zatížení a plochy:

$$H_{CH} = 1570 \frac{W}{l^2} \quad (4)$$

Kde W je velikost zatížení jehlanu v kg a l je výška trojúhelníku změřená na vtisku. Index CH pochází z původního značení mikrotvrlosti, neboť ve starší literatuře je zkouška známa jako zkouška mikrotvrlosti podle Chruščova a Berkoviče. [3]

3.4 Mikrotvrdoměry

Tyto přístroje, jak už vyplývá z názvu, slouží k měření mikrotvrlosti. Mikrotvrdoměry můžeme rozdělit podle provedení na:

- Mikrotvrdoměry s diamantem v samostatném nastavci mimo optiku jsou většinou konstruované jako přístroje pracující samostatně.
- Mikrotvrdoměry, u kterých je diamant vsazený přímo v objektu mikroskopu. Přístroje tohoto typu jsou většinou provázané jako doplněk metalografických mikroskopů.

U obou typů mikrotvrdoměrů mohou být k zatěžování použité buď závity s převodem, bez převodu nebo pružiny (spirálové nebo listové). Velký počet mikrotvrdoměrů je sestrojený pro používání v kombinaci s normálním metalografickým mikroskopem (Hannemanův, Bergsmanův nebo Cookův mikrotvrdoměr). [3]

3.4.1 Hannemanův mikrotvrdoměr

Základ tohoto přístroje spočívá ve spojení Vickersova jehlanu k určování tvrdosti s čelní čočkou metalografického objektivu.

Tato metoda patří mezi nejstarší a nejpoužívanější metody pro hodnocení mikrotvrlosti. Provádí se na metalografických mikroskopech Neophot nebo Epityp. Skládá se z dvou částí:

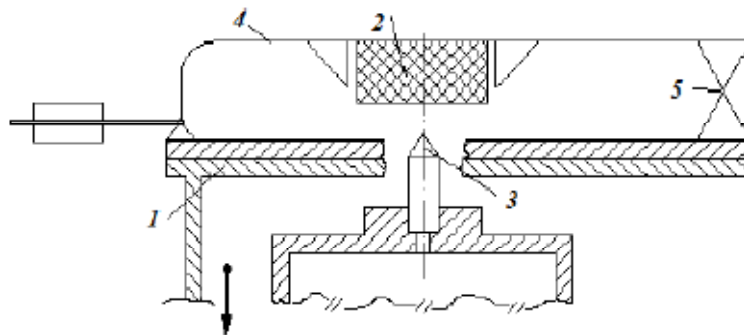
- z nastavce obsahujícího zkušební těleso a zatěžovaný mechanismus,
- z měřícího objektivu. [3]



Obr. 13. Nástavec a měřící objektiv Hannemanova mikrotvrdoměru

3.4.2 Bergsmannův mikrotvrdoměr

Slouží v kombinaci s metalografickým mikroskopem, nemá však diamant vsazený přímo do objektivu. Nástavec s diamantem se nasazuje do mikroskopu tak, že je diamant přesně v optické ose a po vytvoření otlaku se nástavec vymění za objektiv. Přístroj pracuje se zatížením 1 až 200 g. [3]

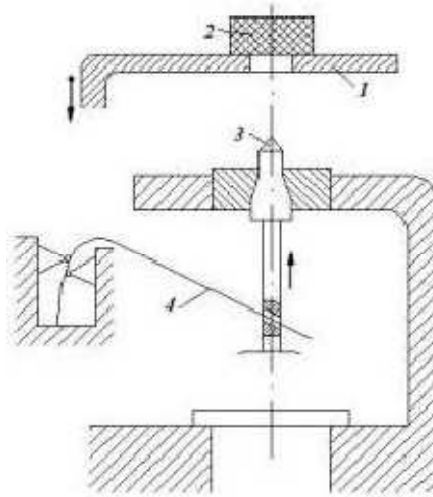


Obr. 14. Schéma Bergsmannova mikrotvrdoměru

(1-stolek, 2-měřené těleso, 3-zkušební těleso(diamant), 4-páka, 5-kontakty elektrického obvodu)

3.4.3 Girschingův mikrotvrdoměr

Otlacek vzniká posuvem stolu 1 se zkušebním vzorkem 2 proti diamantovému jehlanu 3. Deformací pružiny 4 při tomto pohybu se vytváří stálá vtlačující síla. Zatížení můžeme měnit výměnou listových pružin a to v rozsahu 10 až 1000g. Na podobném principu avšak s pružinami spirálovými pracují mikrotvrdoměry Eberhardův a Philipsův. [3]



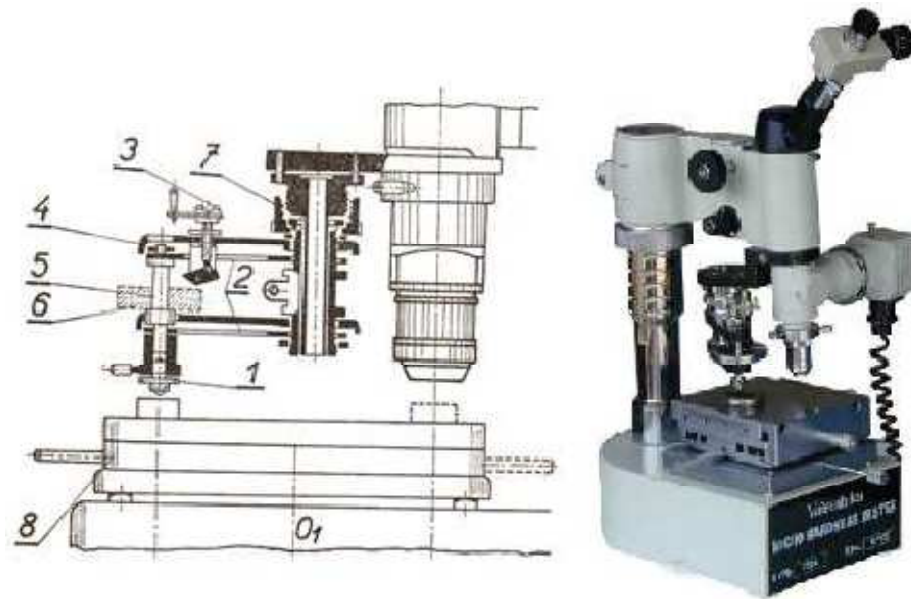
Obr. 15. Schéma Girschingova mikrotvrdoměru

(1-stolek mikrotvrdoměru, 2-měřené těleso, 3-diamantový jehlan, 4-listová pružina)

3.4.4 Mikrotvrdoměr PMT – 3

Tento mikrotvrdoměr je konstruován jako samostatný přístroj. Zkušební těleso má tvar čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° .

Nástavec 1 nesoucí diamant je zavěšený na dvou listových pružinách 2. Pružiny jsou za klidu podepřeny aretačním zařízením 3 a to spojením s pevnou konzolou 4. Na osazení drátku 5 nesoucího nástavce jsou při měření přikládány závaží 6, takže otlacek je vytvářený přímým zatěžováním diamantu. Celé zařízení je možné výškově nastavovat maticí 7 podle měřeného vzorku. Stoliček 8, na kterém je uložený zkušební předmět, je možné natáčet okolo vertikální osy tak, že zvolené místo na vzorku je po otočení stolíčku do krajní polohy přesné v ose diamantového jehlanu. Po vytvoření otlaku a zpětném přetočení stolíčku je opět otlacek přímo v optické ose měřícího mikroskopu. Podmínkou je však správné stranové nastavení objímky s objektivem. [22]



Obr. 16. Mikrotvrdoměr PMT – 3

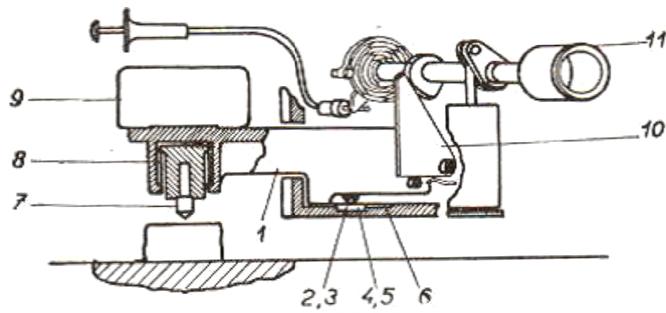
(1-nástavec s diamantem, 2-listové pružiny, 3-aretační mechanismus, 4-pevná konzole, 5-vertikální držák, 6-závaží, 7-stavěcí matice, 8-otočný stůl)

3.4.5 Mikrotvrdoměr Durimet

Tento přístroj je podobné konstrukce jako předešlý typ PMT-3. Podobá se celkovou koncepcí, liší se však v provedení zatěžovacího mechanismu.

Hlavní součást zatěžovacího mechanismu tvoří dvouramenná páka 1. Je otočná kolem dvou ocelových drátů 2,3, dosedajících na destičky 4,5 ze spékaných karbidů, které jsou vsazené do pevné konzoly. K vyloučení vlastní váhy páky a příslušenství slouží listová pružina 6 spojená jedním koncem s pevnou konzolou a druhým koncem s pákou. V delším rameni páky je vsazený nástavec s diamantem 7 a to tak, že je spojený s pouzdrem třemi ocelovými dráty, které jsou při vtlačování namáhané tahem. Zatěžovací závaží 9 se pokládá na volný konec hlavní zatěžovací páky. Její aretace je ovládána destičkou 10, na kterou tlačí nastavitelná vačka. Zařízení se uvádí do chodu stlačením spouštěče, kterým se uvolní spirálová pružina, natáčející vačkovou hřídelí. Aretace se provádí ručně, otáčením hlavice 11. Ostatní části přístroje jsou podobné jako u předcházejícího typu mikrotvrdoměru.

Přístroj Durimet je určený pro zkoušky mikrotvrdoměru podle Vickerse a Knoop a je možné na něm provádět i zkoušky vrypové. Rozsah zatížení je od 15 do 500g. [22]



Obr. 17. Schéma a pohled na mikrotvrdoměr Durimet

(1-dvouramenná páka, 2,3-ocelové hroty, 4,5-opěrné desky, 6-listová pružina, 7-diamantový hrot, 8-ocelové dráty, 9-závaží, 10-trojúhelníková deska, 11-hlavice k ručnímu dotažení)

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této praktické části bakalářské práce bylo měření mikrotvrlosti u směsi vybraných polymerů (PP a PB). Tyto polymery jsme smíchali ve dvou různých poměrech. První směs jsme zvolili PP+PB25% a druhá směs byla zvolena PP+PB50%. Na těchto dvou připravených vzorcích a také na čistém PP jsme provedli zkoušku mikrotvrlosti (vliv množství PB na mikrotvrlost PP). Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a následně vyhodnoceny. Cílem bakalářské práce bylo:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních těles pro zkoušku mikrotvrlosti
3. Provedení zkoušky mikrotvrlosti
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

5 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Polypropylen (PP)

- Hustota: $0,904 \div 0,91 \text{ g.cm}^{-3}$
- Teplota tání: $165 \text{ }^\circ\text{C}$
- Teplota skelného přechodu: $0 \text{ }^\circ\text{C}$
- Modul pružnosti v tahu: $1100 \div 1600 \text{ MPa}$
- Mez pevnosti v tahu: $21 \div 37 \text{ MPa}$

Polybuten (PB)

- Hustota: $0,914 \text{ g.cm}^{-3}$
- Teplota tání: $128 \text{ }^\circ\text{C}$
- Teplota skelného přechodu: $-25 \div -17 \text{ }^\circ\text{C}$
- Modul pružnosti v tahu: $290 \div 295 \text{ MPa}$
- Mez pevnosti v tahu: $19,5 \div 35 \text{ MPa}$

6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Pro provedení zkoušky mikrovrstosti jsme použili zkušební vzorky, které byly vystříknuty na vstřikovacím stroji ARBURG 420 C Allrounder Advanced. Tento stroj má uzavírací sílu 1000 kN, průměr šneku 40 mm a maximální vstřikovací objem 182 cm³. Maximální rozměr formy u tohoto typu stroje je 420x420x500 mm.

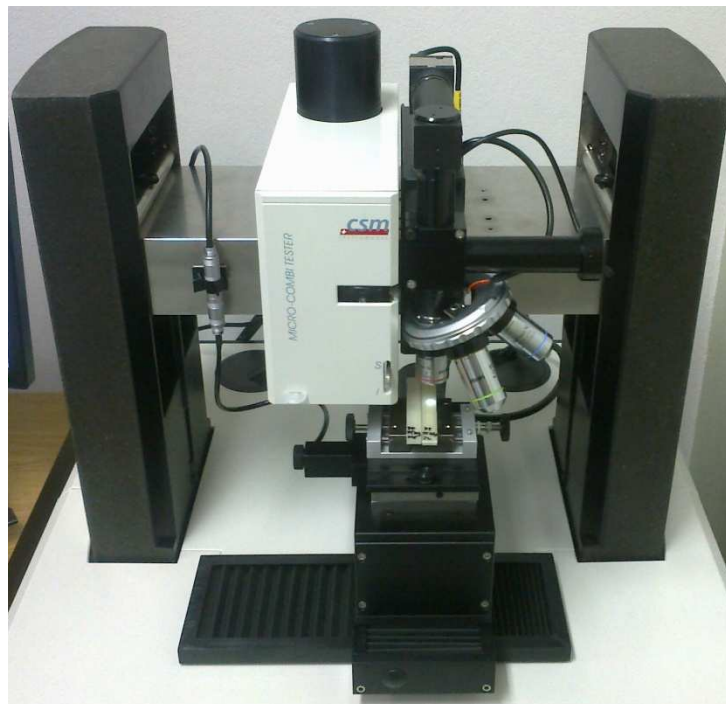


Obr. 18. Vstřikovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advanced

7 ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI

Pro měření mikrotvrdomosti jsme použili přístroj Micro Combi Testeru od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Pro samotnou zkoušku mikrotvrdomosti jsme zvolili zatížení o velikosti 0,5N, 1N a 5N s výdrží 90 s. Zatěžující a odtěžující rychlost byla použita 2 N/min. Měření jsme prováděli metodou DSI (Depth Sensing Indentation) neboli Instrumentovanou vnikající zkouškou tvrdosti. Poissonovo číslo bylo použito 0,3, protože nebylo možné změřit jeho hodnotu u testovaných zkušebních těles.

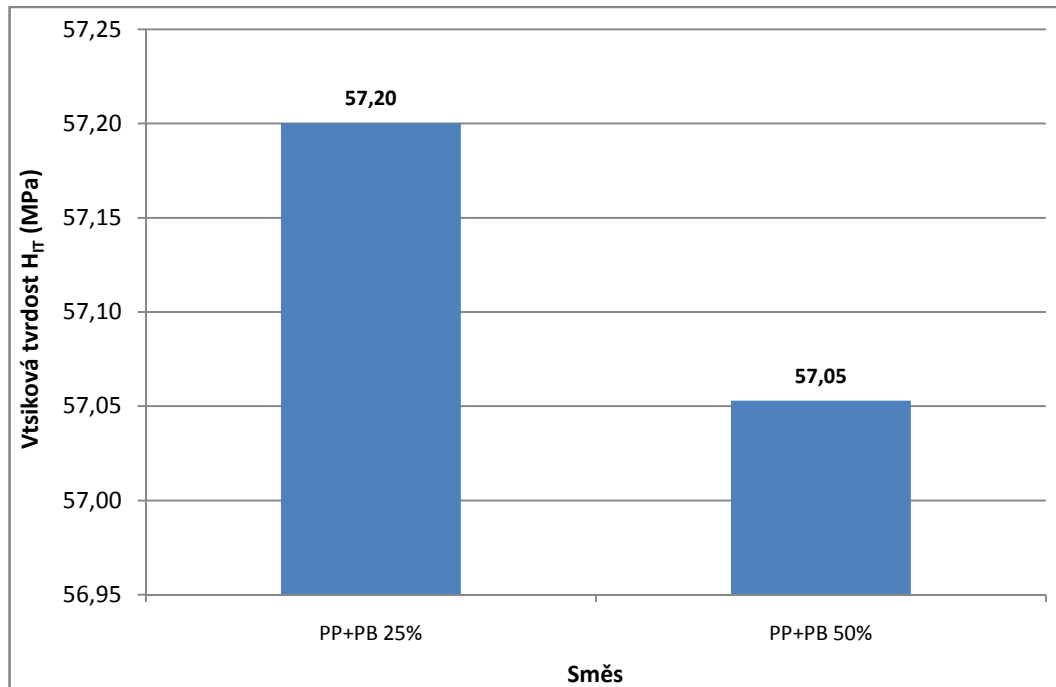
Metoda DSI (Depth Sensing Indentation) se začala používat v sedmdesátých letech 20. století. Zásadní vylepšení metodologie, analýzy a shromáždění dat provedli až Oliver & Pharr na počátku let osmdesátých. Tato metoda se vyznačuje tím, že měřicí přístroj současně detekuje okamžitou změnu hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu v závislosti na plynulém nárůstu / poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího cyklu. Grafickým zpracováním dat vzniká charakteristická indentační křivka závislosti zatížení na hloubce vtisku. Díky možnosti napojení měřicího přístroje na PC jsou průběhy zkoušek ihned zaznamenány současně s vyhodnocením některých materiálových parametrů.[3]



Obr. 19. Přístroj pro měření mikrotvrdomosti - Micro Combi Tester

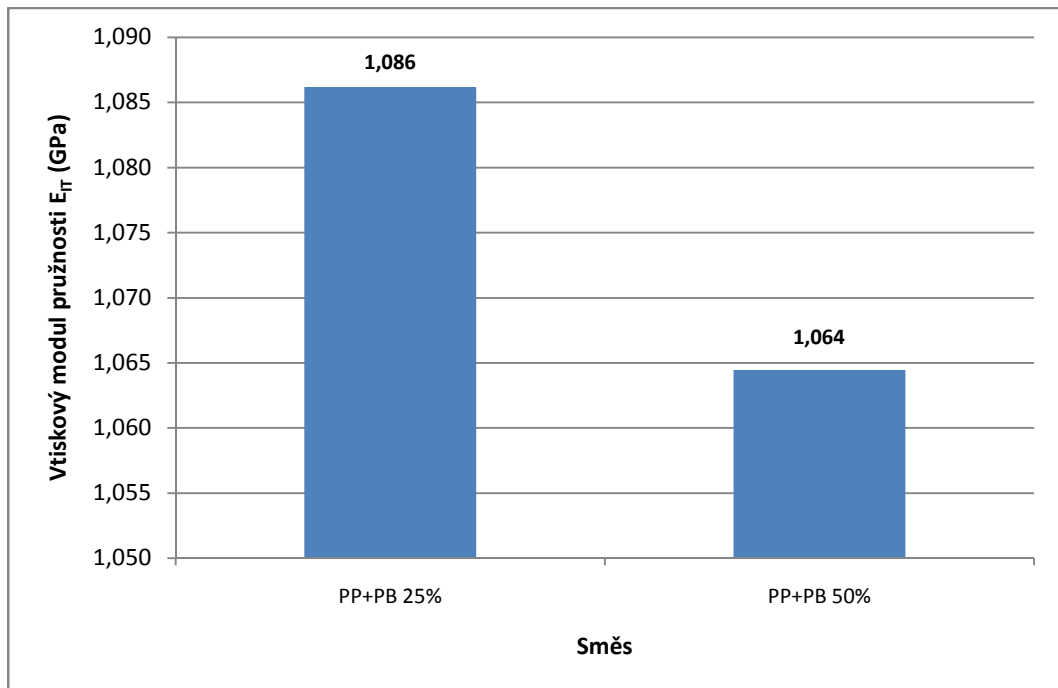
8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ MIKROTVRDOŠI

8.1 Měření mikrotvrdoši při velikosti zatížení 0,5N



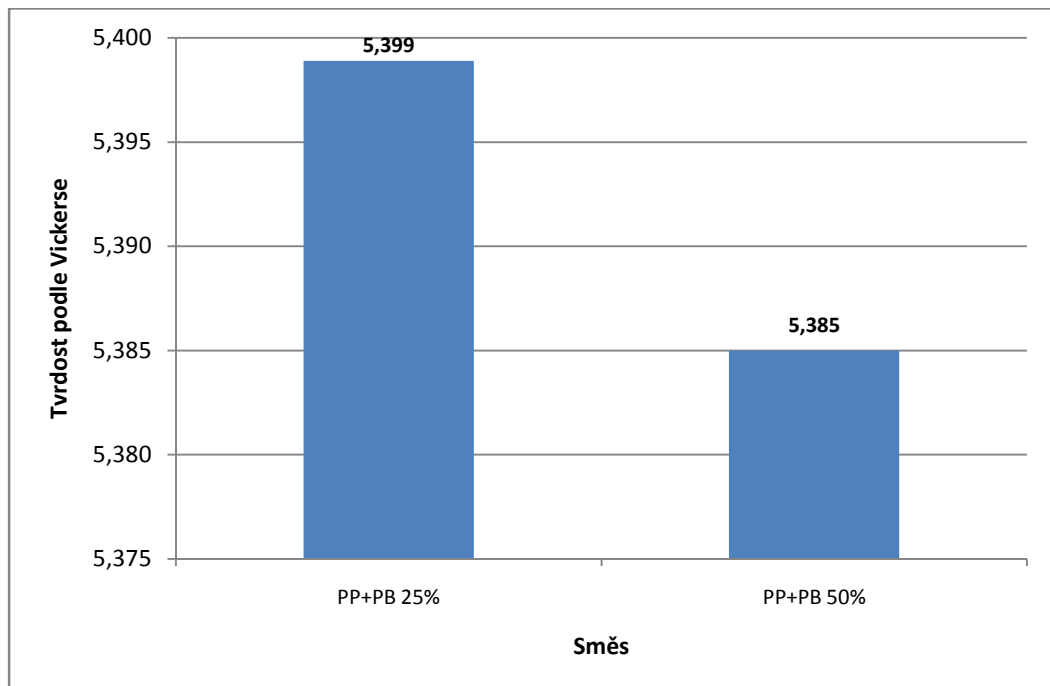
Obr. 20. Vtisková tvrdost při zatížení 0,5N

Při zkoušce mikrotvrdoši bylo zjišeno, že nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u PP+PB25% (57,20 MPa), naopak nejmenší hodnoty bylo dosaženo u PP+PB50% (57,05MPa), jak je patrné z obr.20.



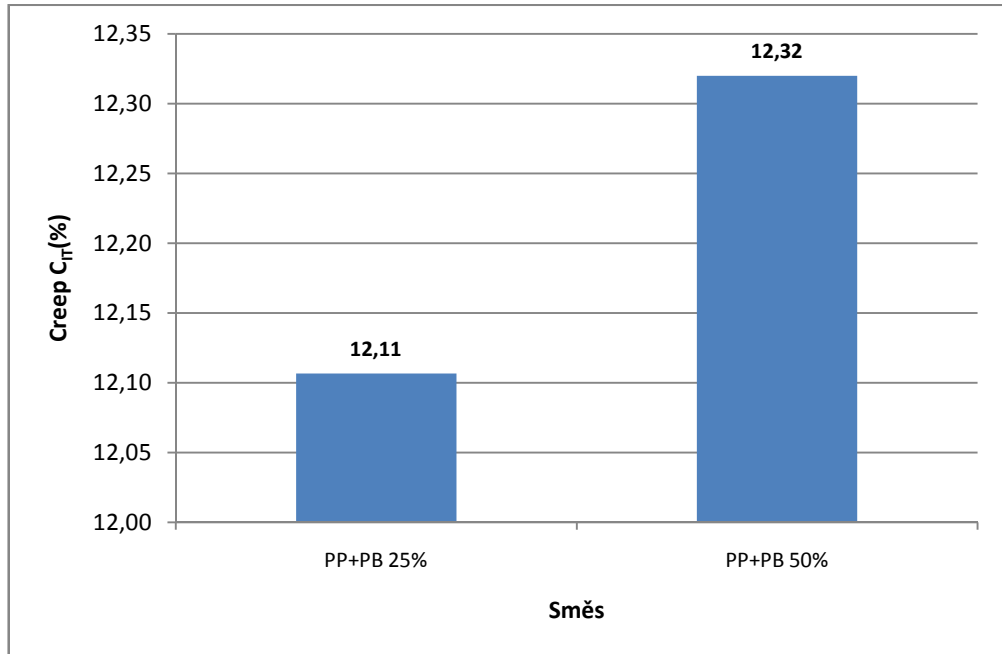
Obr. 21. Vtiskový modul pružnosti při zatížení 0,5N

Z výsledků měření vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla zjištěna u PP+PB25% (1,086 GPa), zatím co nejmenší hodnota vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) byla naměřena u PP+PB50% (1,064 GPa). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr.21.



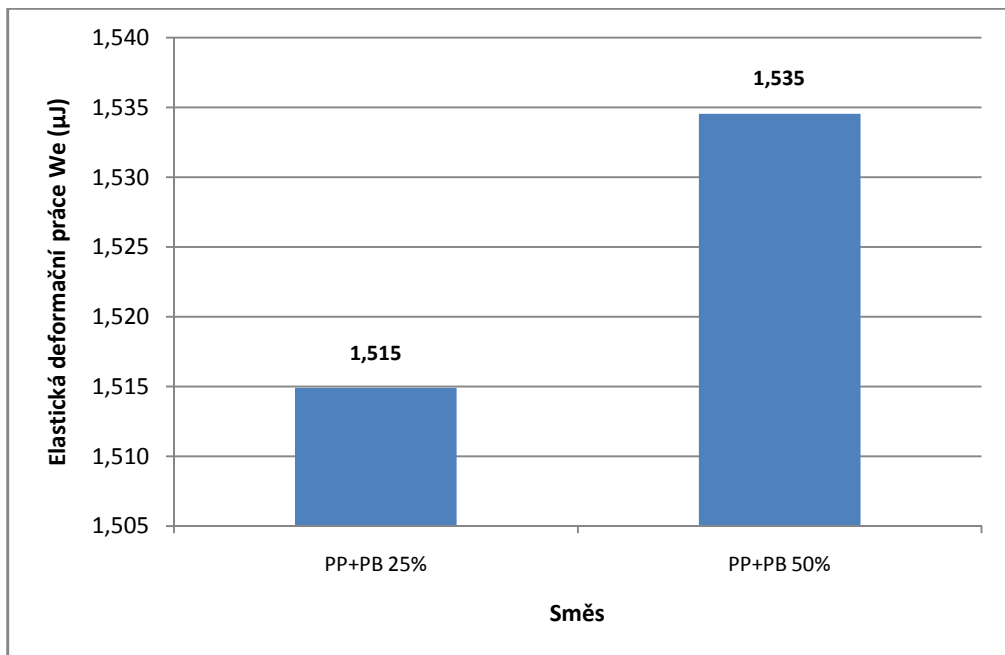
Obr. 22. Tvrdość podle Vickerse při zatížení 0,5 N

Při měření tvrdosti podle Vickerse jsme zjistili, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u PP+PB25% (5,399) a nejmenší hodnota tvrdosti byla zjištěna u PP+PB50% (5,385). Tyto výsledky jsou zobrazeny na obr.22.



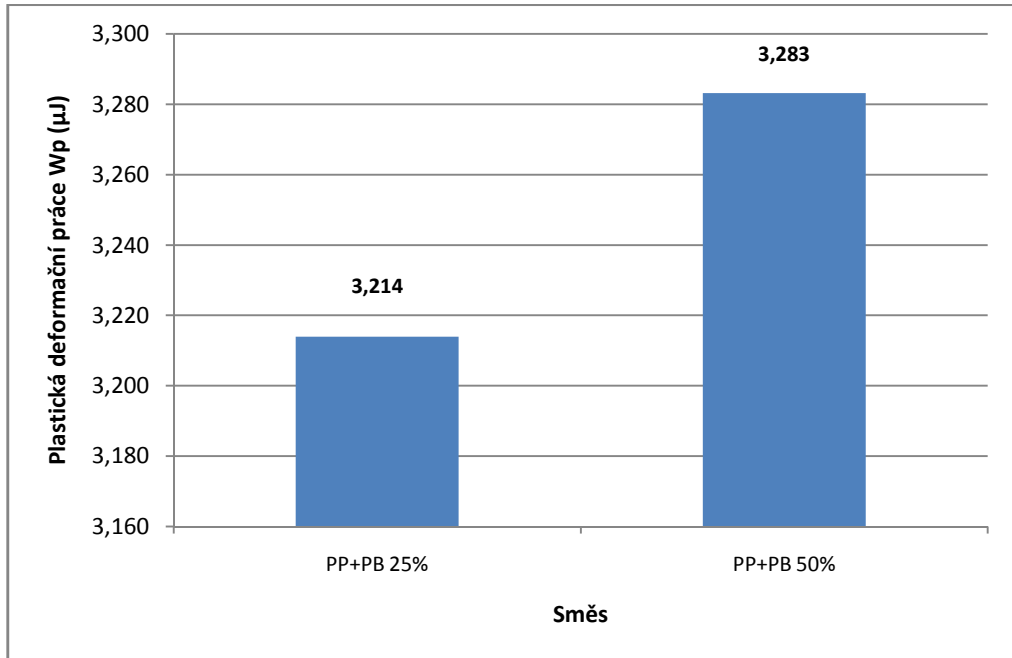
Obr. 23. Creep při zatížení 0,5N

Z výsledků měření creepu vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla zjištěna u PP+PB50% (12,32%), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u PP+PB25% (12,11%). Zmiňované výsledky vidíme na obr.23.



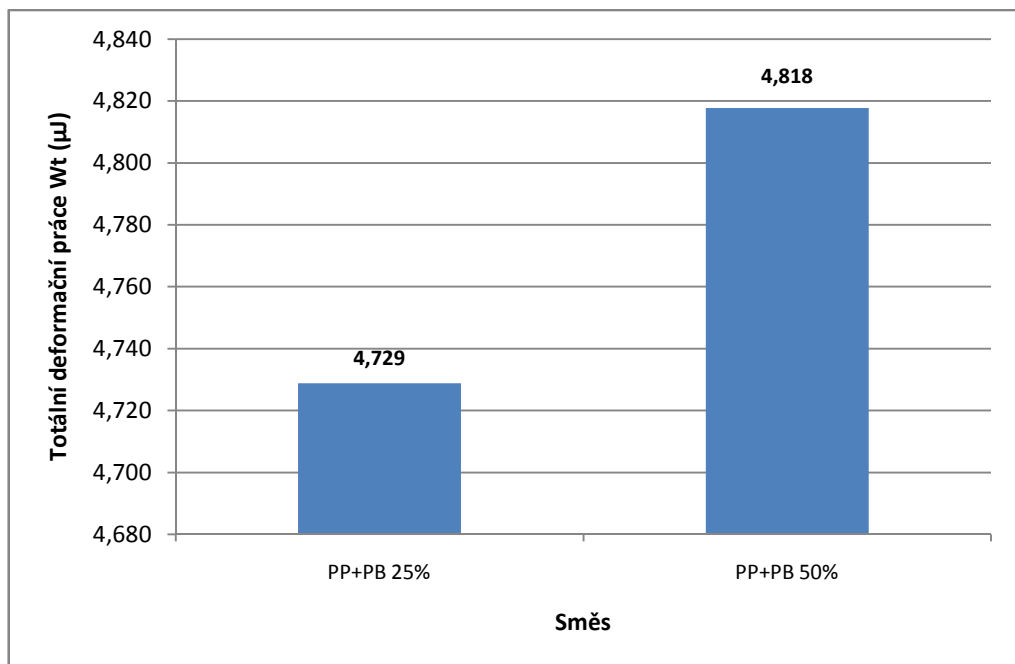
Obr. 24. Elastická deformační práce při zatížení 0,5N

Při měření elastické deformační práce jsme zjistili, že nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u PP+PB50% (1,535 μ J), zatím co nejmenší hodnota elastické deformační práce byla naměřena u PP+PB25% (1,515 μ J). Tyto výsledky jsou patrné z obr.24.



Obr. 25. Plastická deformační práce při zatížení 0,5N

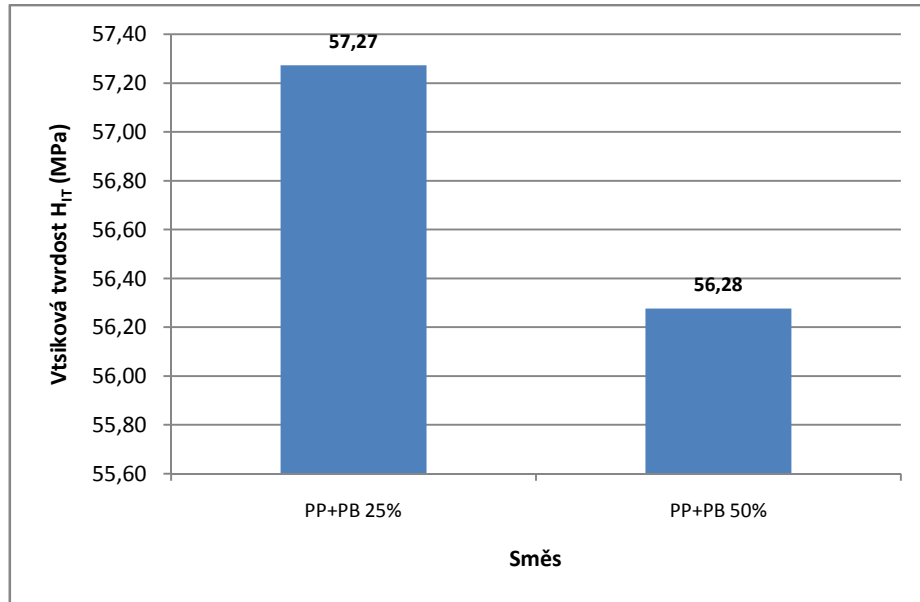
Při měření plastické deformační práce se ukázalo, že nejvyšší hodnota byla zjištěna u PP+PB50% (3,283 μ J), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u PP+PB25% (3,214 μ J). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr.25.



Obr. 26. Totální deformační práce při zatížení 0,5N

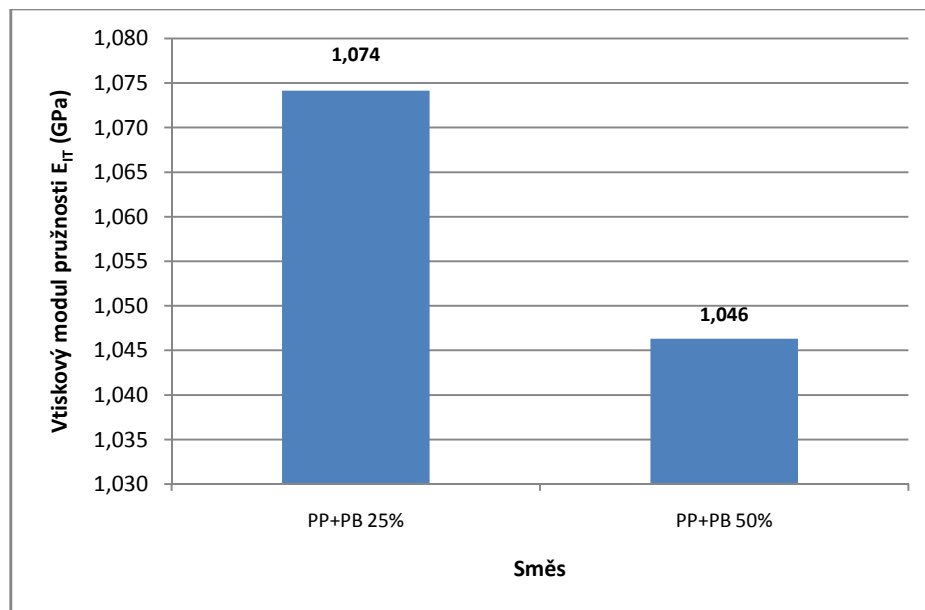
Z výsledků měření totální deformační práce vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla naměřena u PP+PB50% (4,818 μ J), zatím co nejmenší hodnota byla zjištěna u PP+PB25% (4,729 μ J). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr.26.

8.2 Měření mikrotvrdomosti při velikosti zatížení 1N



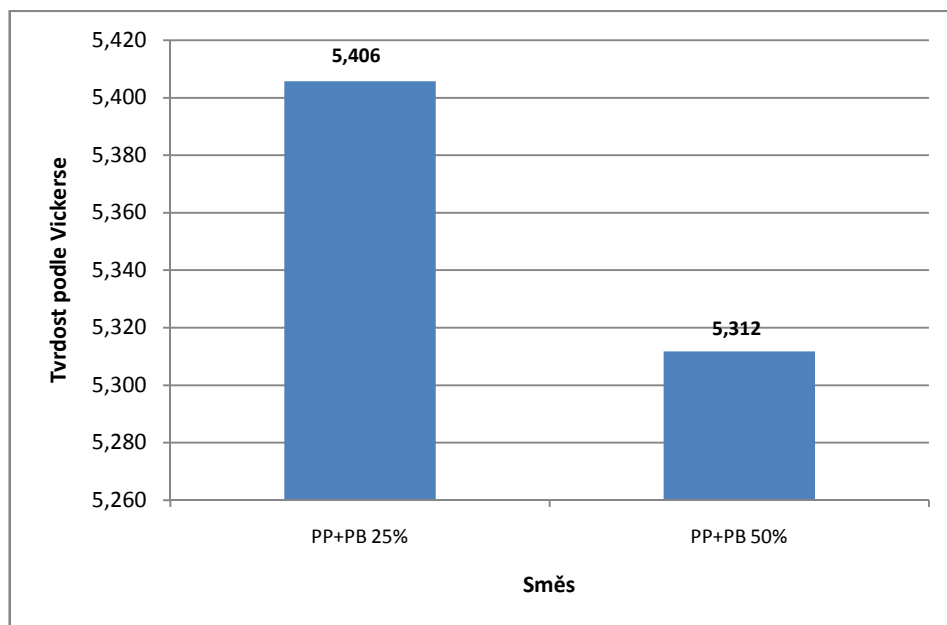
Obr 27. Vtisková tvrdost při zatížení 1N

Při zkoušce mikrotvrdomosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u PP+PB25% (57,27 MPa), naopak nejmenší hodnoty bylo dosaženo u PP+PB50% (56,28MPa), jak je patrné z obr.27.



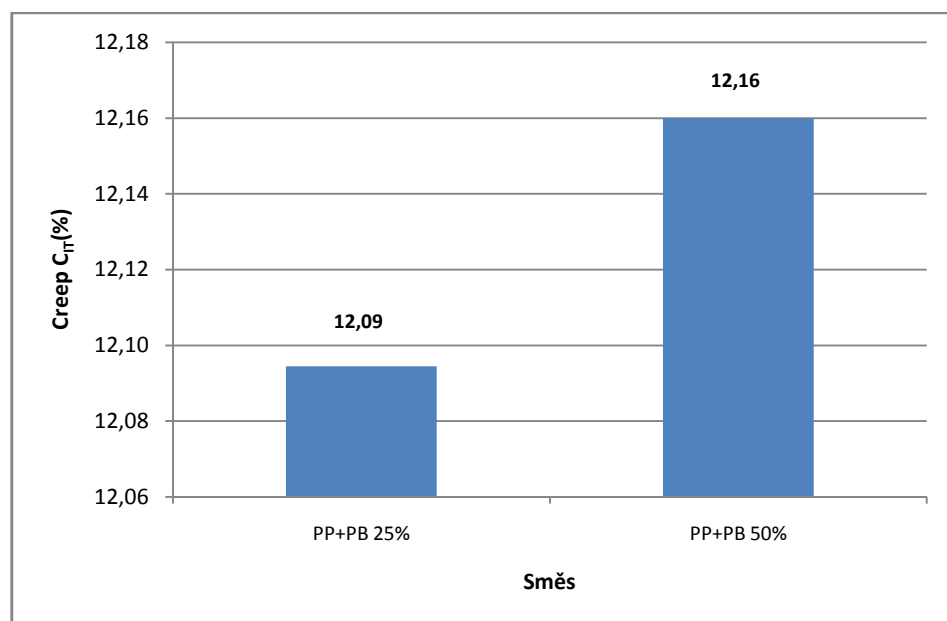
Obr. 28. Vtiskový modul pružnosti při zatížení 1N

Z výsledků měření vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla zjištěna u PP+PB25% (1,074 GPa), zatím co nejmenší hodnota vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) byla naměřena u PP+PB50% (1,046 GPa). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr.28.



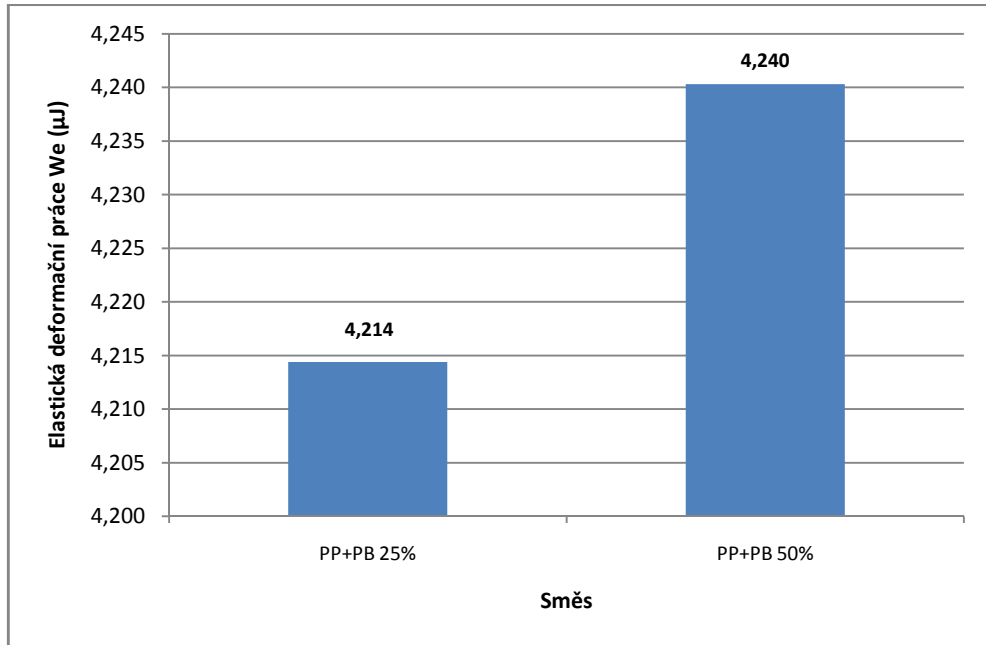
Obr. 29. Tvrdość podle Vickerse při zatížení 1N

Při měření tvrdosti podle Vickerse jsme zjistili, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u PP+PB25% (5,406) a nejmenší hodnota tvrdosti byla zjištěna u PP+PB50% (5,312). Tyto výsledky jsou zobrazeny na obr.29.



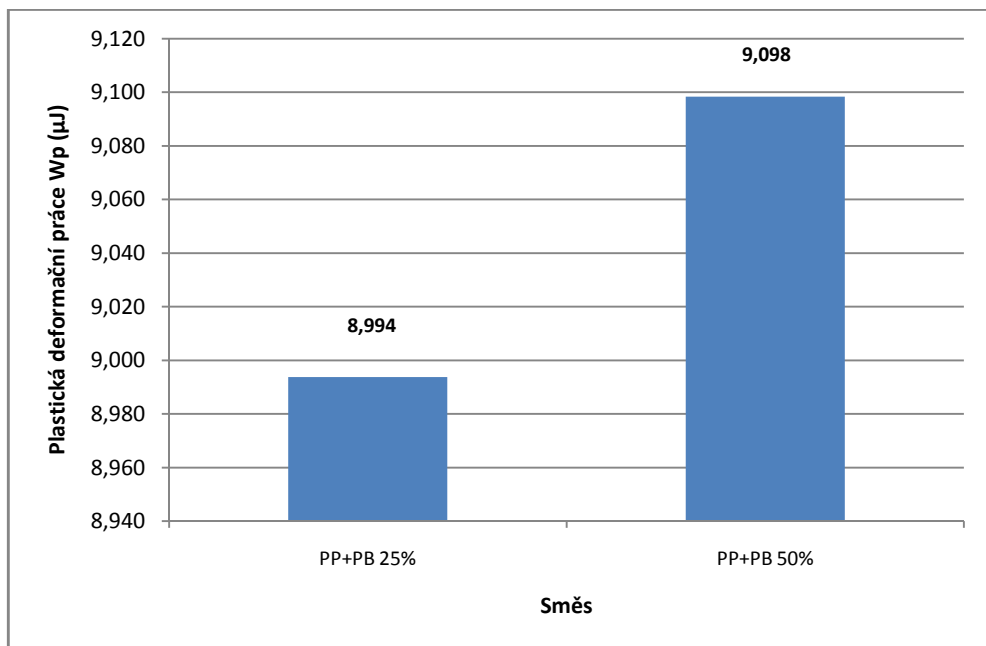
Obr. 30. Creep při zatížení 1N

Z výsledků měření creepu vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla zjištěna u PP+PB50% (12,16%), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u PP+PB25% (12,09%). Zmiňované výsledky vidíme na obr.30.



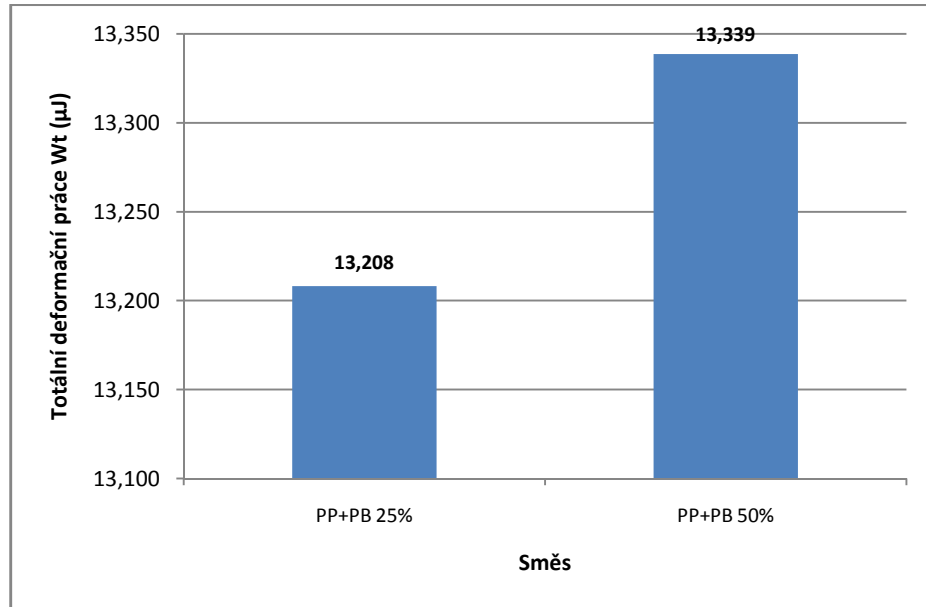
Obr. 31. Elastická deformační práce při zatížení 1N

Při měření elastické deformační práce jsme zjistili, že nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u PP+PB50% (4,240 μJ), zatím co nejmenší hodnota elastické deformační práce byla naměřena u PP+PB25% (4,214 μJ). Tyto výsledky jsou patrné z obr.31.



Obr. 32. Plastická deformační práce při zatížení 1N

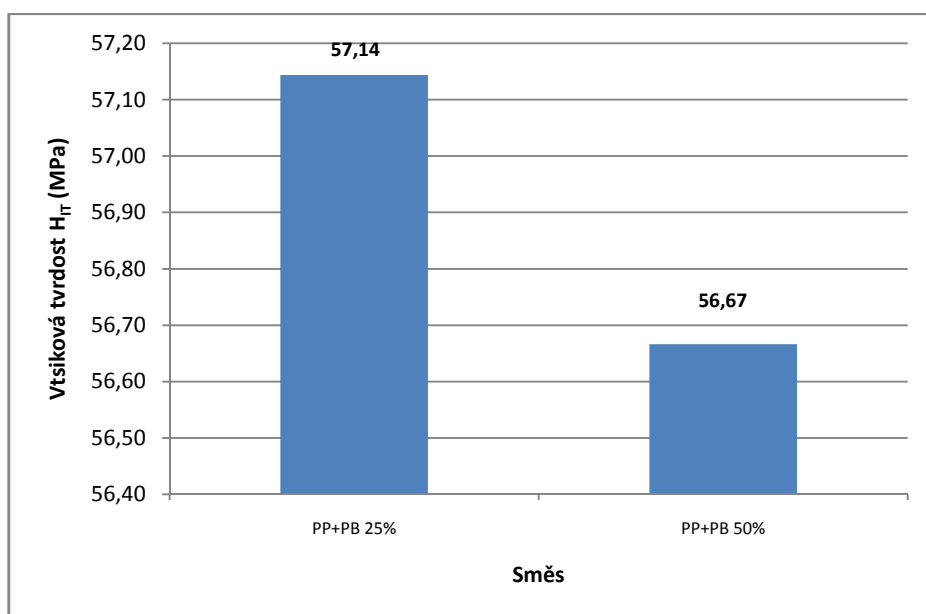
Při měření plastické deformační práce se ukázalo, že nejvyšší hodnota byla zjištěna u PP+PB50% (9,098 μJ), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u PP+PB25% (8,994 μJ). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr.32.



Obr. 33. Totální deformační práce při zatížení 1N

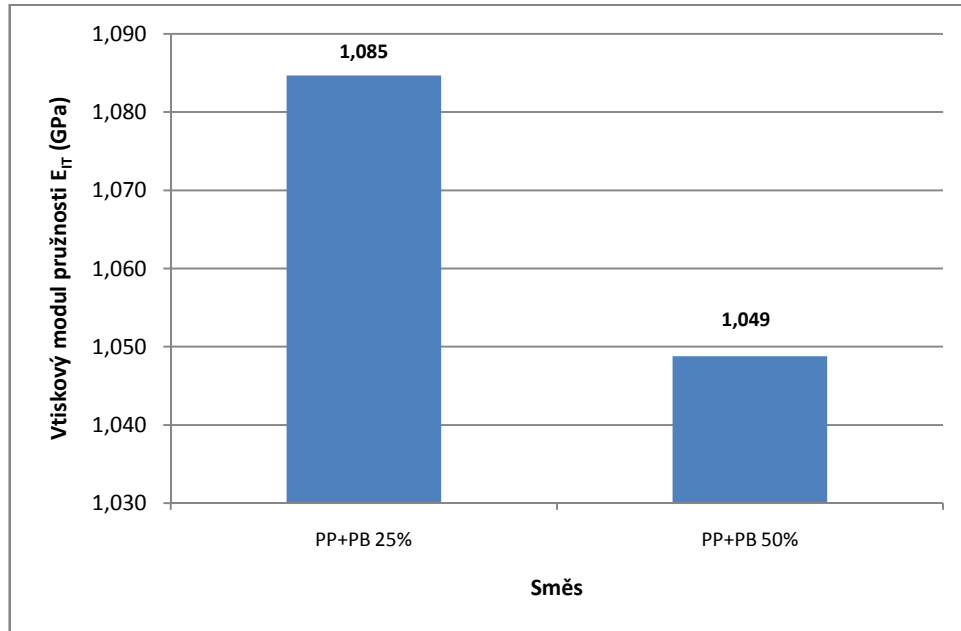
Z výsledků měření totální deformační práce vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla naměřena u PP+PB50% (13,339 μJ), zatím co nejmenší hodnota byla zjištěna u PP+PB25% (13,208 μJ). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr.33.

8.3 Měření mikrotvrdosti při velikosti zatížení 5N



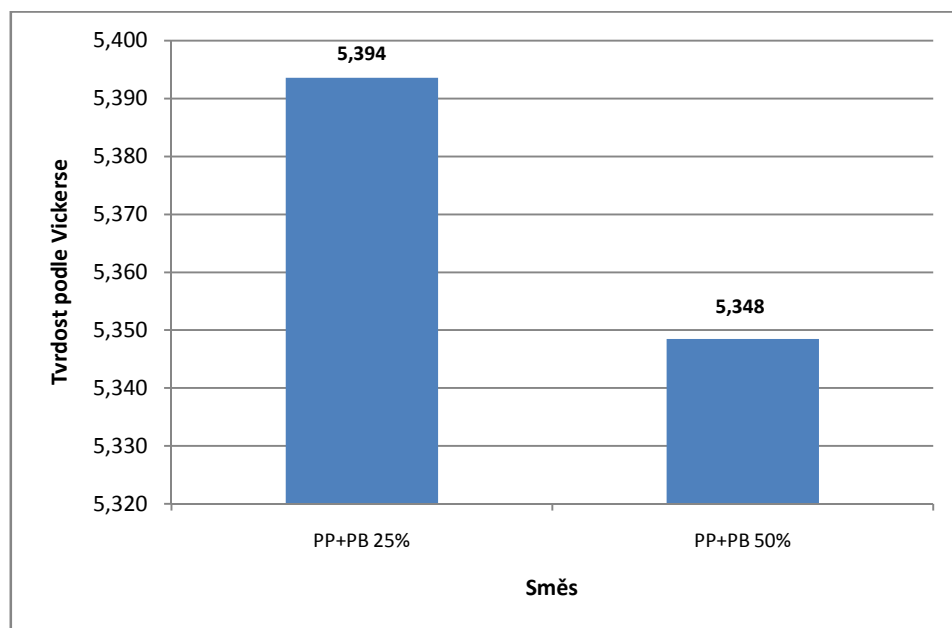
Obr. 34. Vtisková tvrdost při zatížení 5N

Při zkoušce mikrotvrdomosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u PP+PB25% (57,14 MPa), naopak nejmenší hodnoty bylo dosaženo u PP+PB50% (56,67 MPa), jak je patrné z obr.34.



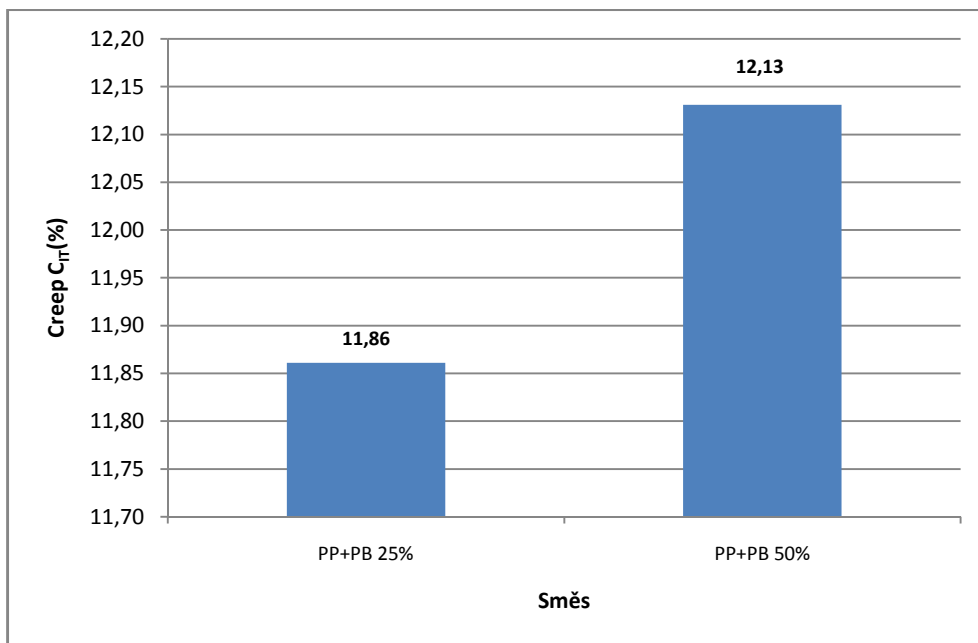
Obr. 35. Vtiskový modul pružnosti při zatížení 5N

Z výsledků měření vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla zjištěna u PP+PB25% (1,085 GPa), zatím co nejmenší hodnota vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) byla naměřena u PP+PB50% (1,049 GPa). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr.35.



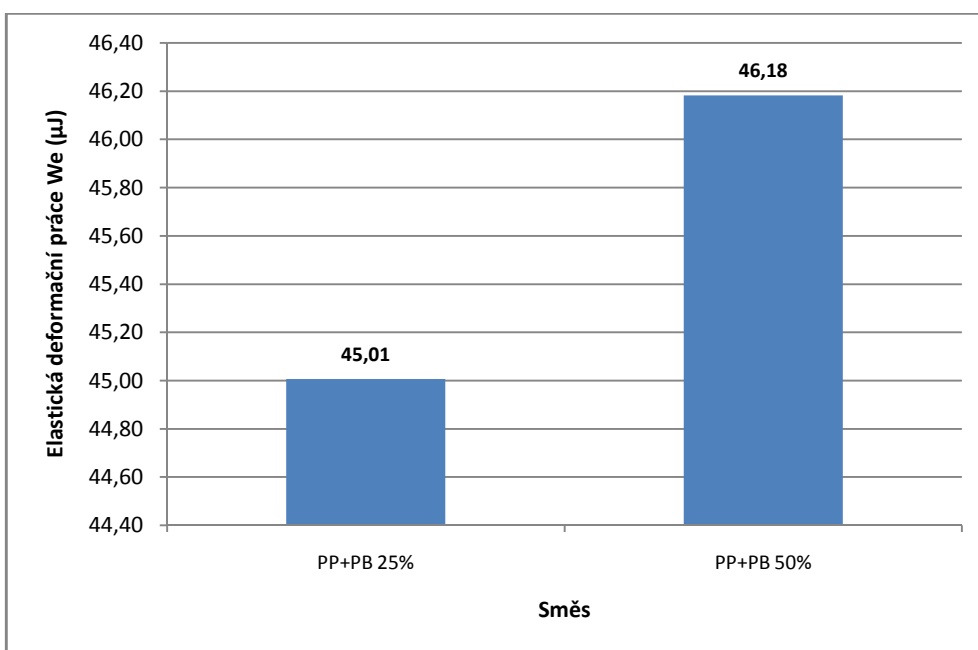
Obr. 36. Tvrdomost podle Vickerse při zatížení 5N

Při měření tvrdosti podle Vickerse jsme zjistili, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u PP+PB25% (5,394) a nejmenší hodnota tvrdosti byla zjištěna u PP+PB50% (5,348). Tyto výsledky jsou zobrazeny na obr.36.



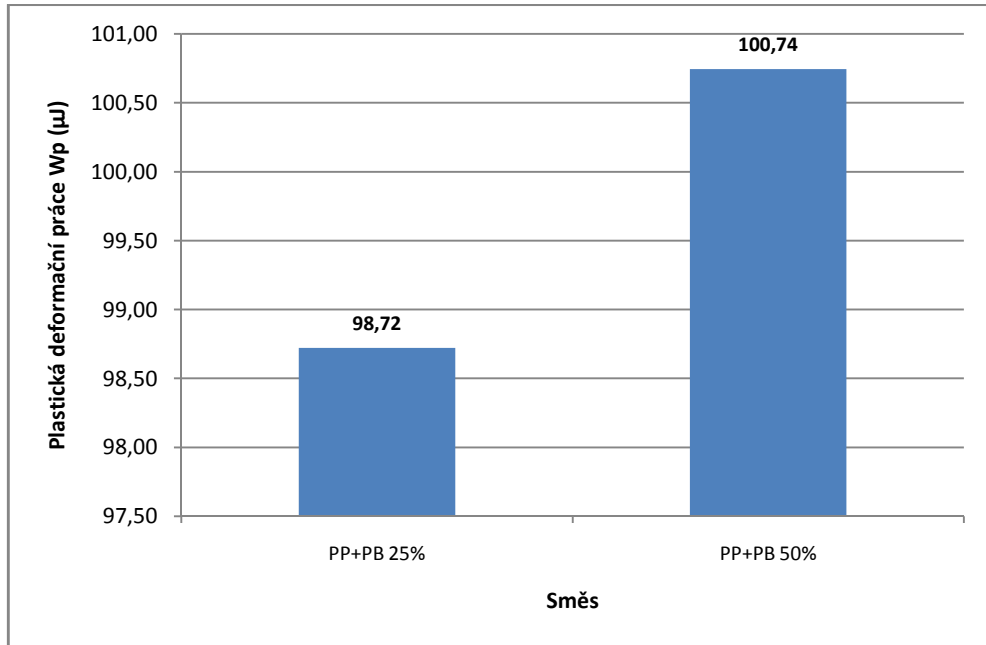
Obr. 37. Creep při zatížení 5N

Z výsledků měření creepu vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla zjištěna u PP+PB50% (12,13%), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u PP+PB25% (11,86%). Zmiňované výsledky vidíme na obr.37.



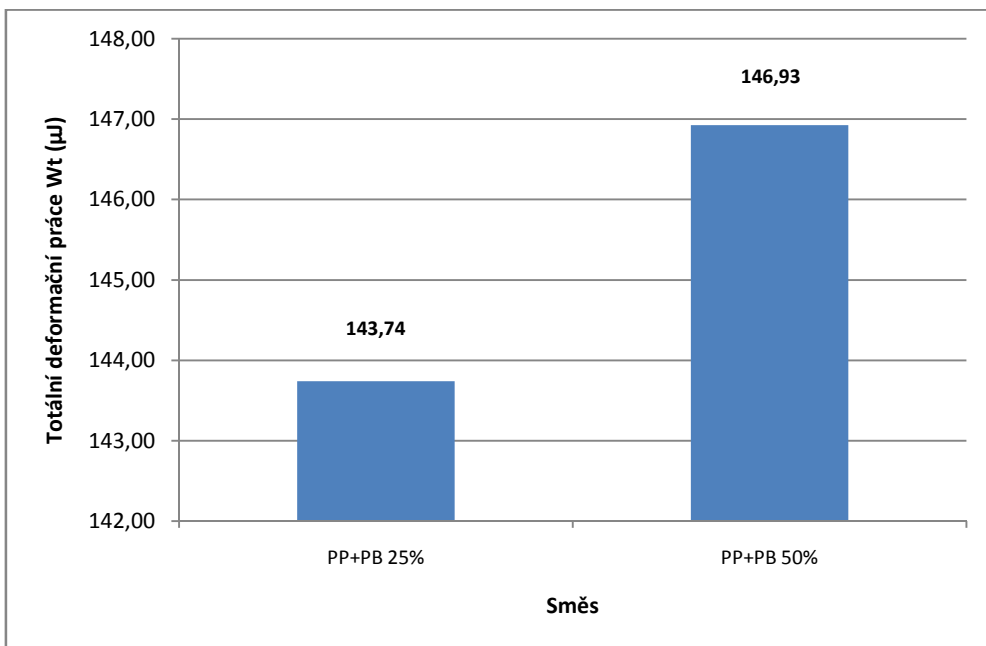
Obr. 38. Elastická deformační práce při zatížení 5N

Při měření elastické deformační práce jsme zjistili, že nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u PP+PB50% (46,18 μ J), zatím co nejmenší hodnota elastické deformační práce byla naměřena u PP+PB25% (45,01 μ J). Tyto výsledky jsou patrné z obr.38.



Obr. 39. Plastická deformační práce při zatížení 5N

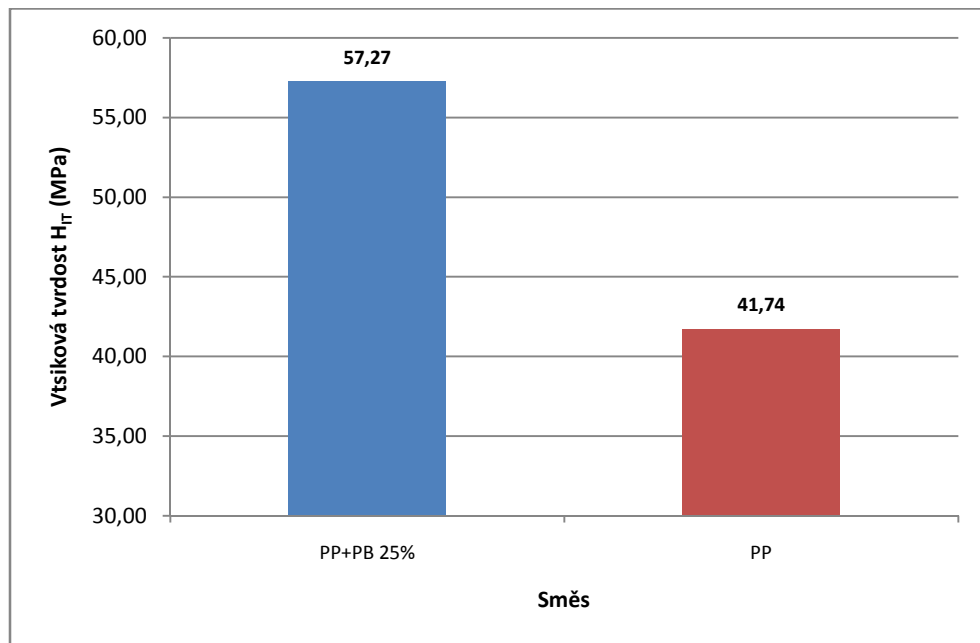
Při měření plastické deformační práce se ukázalo, že nejvyšší hodnota byla zjištěna u PP+PB50% (100,74 μ J), naopak nejmenší hodnota byla naměřena u PP+PB25% (98,72 μ J). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr.39.



Obr. 40. Totální deformační práce při zatížení 5N

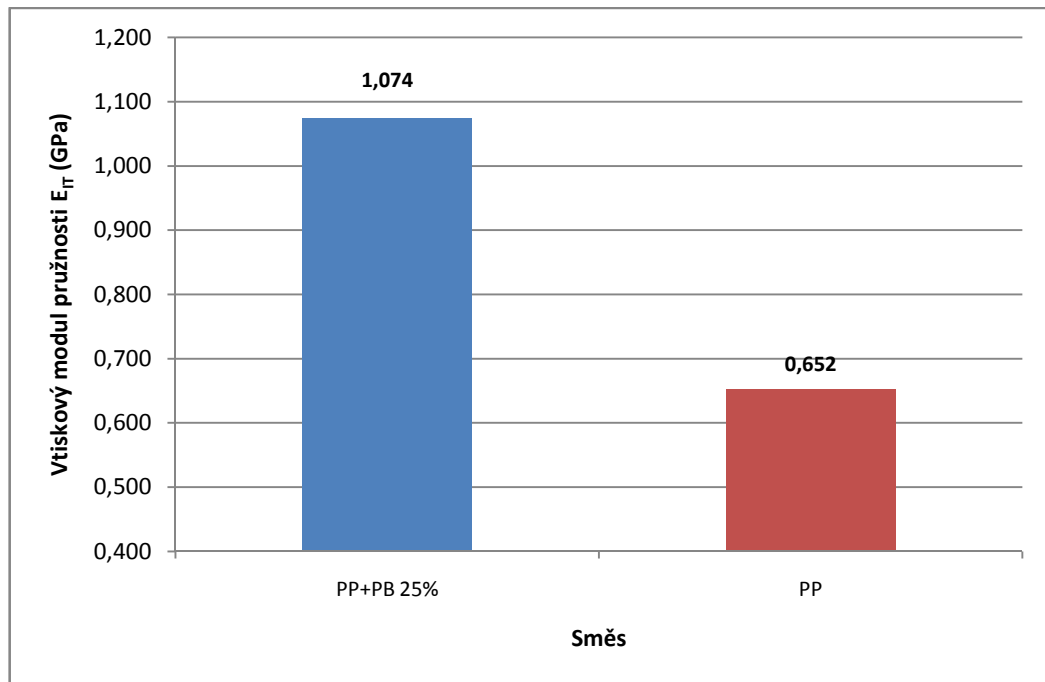
Z výsledků měření totální deformační práce vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla naměřena u PP+PB50% (146,93 μ J), zatím co nejmenší hodnota byla zjištěna u PP+PB25% (143,74 μ J). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr.40.

8.4 Porovnání výsledků měření mikrotvrdosti u vybrané směsi PP+PB25% a čistého PP při zvoleném zatížení 1N



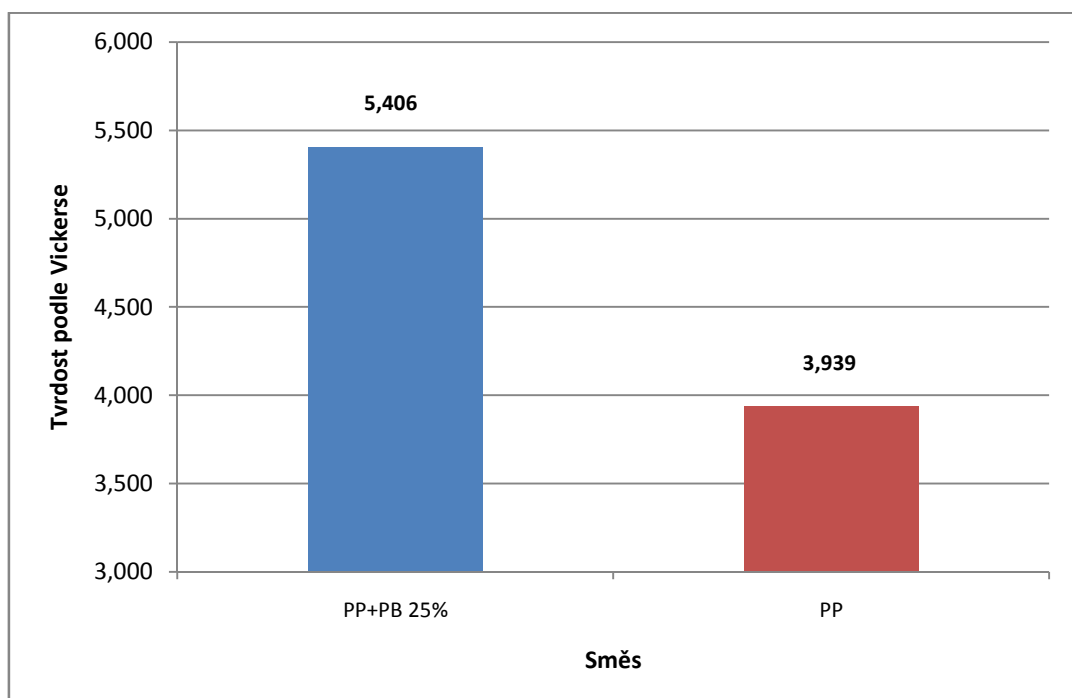
Obr. 41. Vtisková tvrdost směsi a čistého PP

Z obr. 41. vyplývá, že naměřená vtisková tvrdost směsi PP+PB25% (57,27 MPa) byla výrazně vyšší než vtisková tvrdost čistého PP (41,74 MPa).



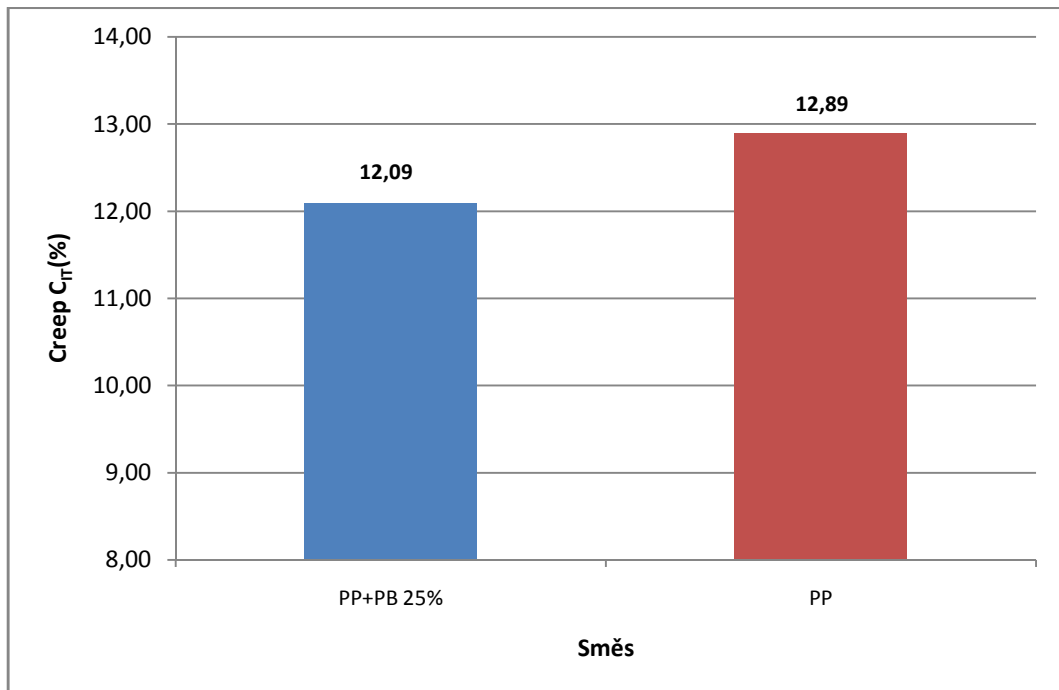
Obr. 42. Vtiskový modul pružnosti směsi a čistého PP

Při měření vtiskového modul pružnosti (tuhosti) bylo zjištěno, že podstatně vyšších hodnot než čistý PP (0,652 GPa) dosáhla směs PP+PB25% (1,074 GPa), jak můžeme vidět na obr. 42.



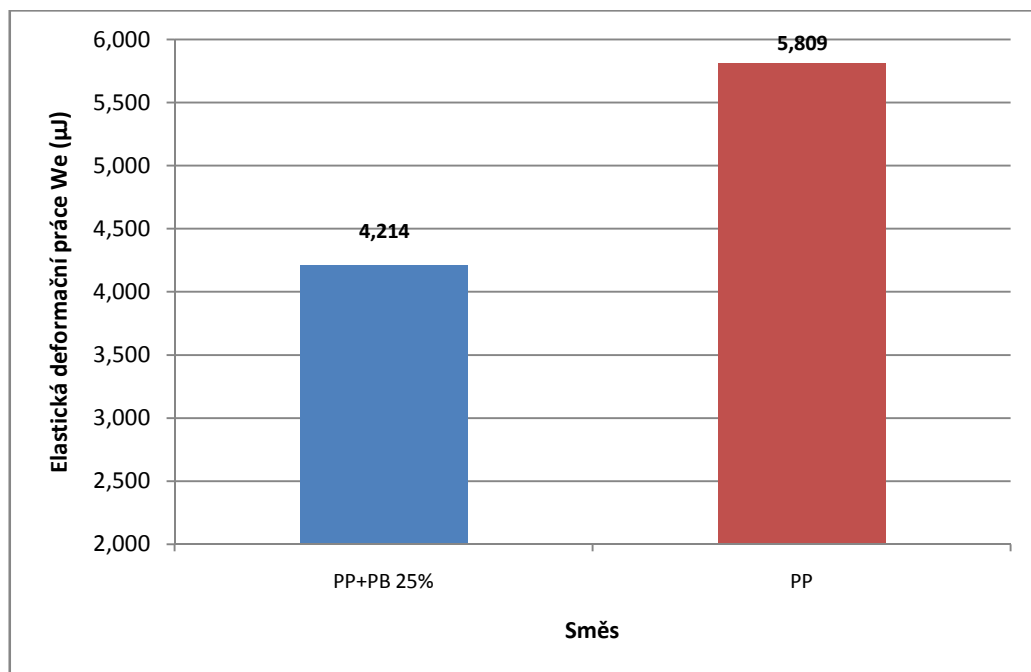
Obr. 43. Tvrdość směsi a čistého PP podle Vickerse

Při měření mikrotvrdomosti bylo zjištěno, že směs PP+PB25% vykazuje výrazně vyšší tvrdost podle Vickerse (5,406) než je tomu u čistého PP (3,939). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr. 43.



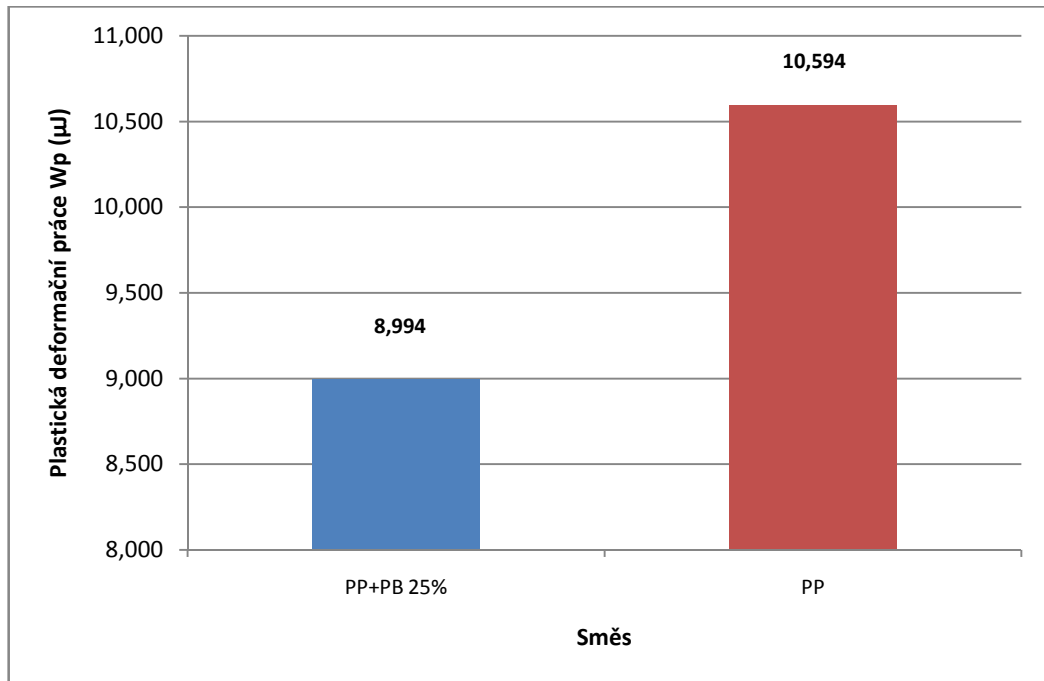
Obr. 44. Creep směsi a čistého PP

Z obr. 44. je patrné, že nejvyšší hodnota creepu byla zjištěna u čistého PP (12,89%), naopak nejnižší hodnota creepu byla naměřena u směsi PP+PB25% (12,09%).



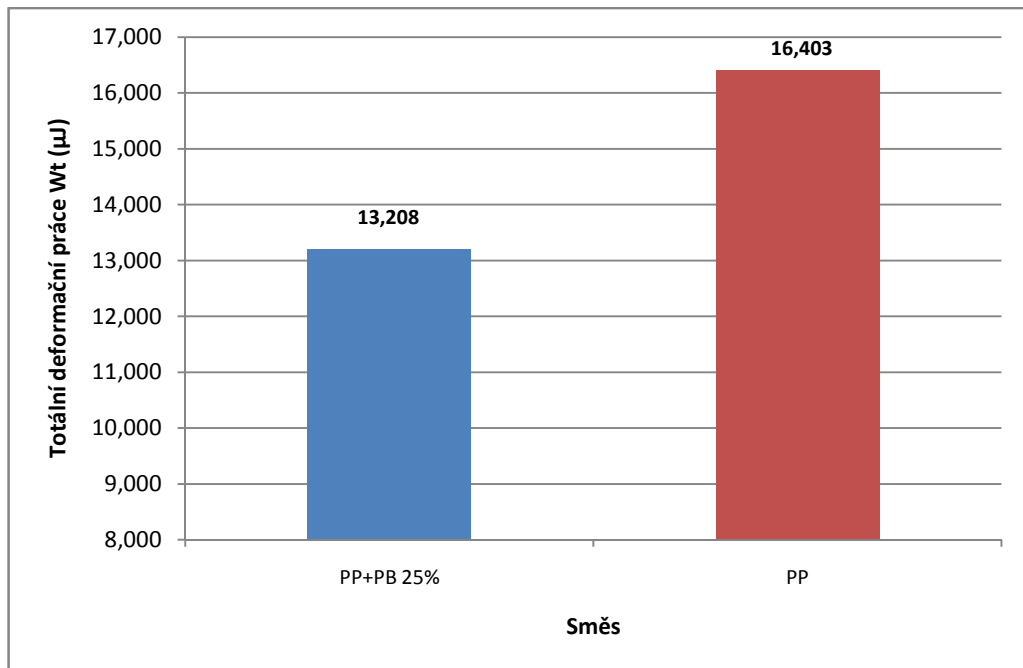
Obr. 45. Elastická deformační práce směsi a čistého PP

Elastická deformační práce byla naměřena u čistého PP (5,809 μJ) vyšší než u směsi PP+PB25% (4,214 μJ). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr. 45.



Obr. 46. Plastická deformační práce směsi a čistého PP

Z obr. 46. je zřejmé, že naměřená hodnota plastické deformační práce byla u čistého PP (10,594 μJ) vyšší než u směsi PP+PB25% (8,994 μJ).



Obr. 47. Totální deformační práce směsi a čistého PP

Z výsledků měření totální deformační práce vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla naměřena u čistého PP (16,403 μJ), zatím co nejmenší hodnota byla zjištěna u PP+PB25% (13,208 μJ). Uvedené výsledky jsou zobrazeny na obr.47.

9 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Bakalářská práce popisuje měření mikrotvrdomosti u směsi vybraných polymerů (PP a PB). Tyto polymery byly smíchány ve dvou různých poměrech. První směs jsme zvolili PP+PB25% a druhá směs byla zvolena PP+PB50%. Na těchto dvou připravených vzorcích směsi a také na čistém PP bylo realizováno měření mikrotvrdomosti (vliv množství PB na mikrotvrdomost směsi PP+PB). Nejdříve jsme graficky srovnali a následně vyhodnotili naměřené hodnoty u obou směsí. Nakonec došlo také ke srovnání a vyhodnocení naměřených hodnot vybrané směsi s čistým PP.

Z naměřených výsledků měření mikrotvrdomosti vyplynulo, že největší hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT} vykazovala směs PP +PB25%. Nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti byly naměřeny u všech aplikovaných zatížení (0,5N, 1N a 5N) právě u této směsi. Pokud se podíváme na další výsledky měření mikrotvrdomosti, zjistíme, že u vtiskového modulu pružnosti E_{IT} bylo dosaženo nejvyšších hodnot také u směsi PP+PB25%. Vtiskový modul pružnosti dosáhl nejvyšších hodnot u směsi PP+PB25% také při aplikaci všech zvolených typů zatížení. Nejmenších hodnot vtiskové tvrdosti (H_{IT}) a vtiskového modulu pružnosti (E_{IT}) bylo dosaženo u směsi PP+PB50% a to také při všech aplikovaných zatížení (0,5N, 1N a 5N).

Pokud se týká výsledků Creepu, byly nejmenší a tudíž nejlepší hodnoty zjištěny u směsi PP+PB25%. Naopak nejhorších výsledků bylo dosaženo u směsi PP+PB50% a to při všech aplikovaných zatížení. Stejně výsledky byly naměřeny i u elastické a plastické deformační práce. Také zde byly zjištěny při použití všech zatížení (0,5N, 1N, a 5N) nejlepší hodnoty u směsi PP+PB25% a nejhorší hodnoty u směsi PP+PB50%.

Při srovnání směsi PP+PB25% a čistého PP při zvoleném zatížení 1N bylo zjištěno, že čistý PP má oproti této směsi výrazně nižší hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT} i vtiskového modulu pružnosti E_{IT} . Naopak vyšších hodnot Creepu i obou deformačních prací (plastické i elastické) bylo dosaženo u čistého PP.

ZÁVĚR

Bakalářská práce popisuje měření mikrotvrdomosti u směsi vybraných polymerů (PP a PB). Tyto polymery byly smíchány ve dvou různých poměrech. První směs jsme zvolili PP+PB25% a druhá směs byla zvolena PP+PB50%. Na těchto dvou připravených vzorcích směsi a také na čistém PP bylo realizováno měření mikrotvrdomosti (vliv množství PB na mikrotvrdomost směsi PP+PB). Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření vyplynulo, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti a vtiskového modulu pružnosti byly naměřeny u směsi PP+25%PB při aplikaci všech zvolených zatížení. Naopak hodnoty creepu, deformační plastické a elastické práce vykazaly u zmíněné směsi PP+25%PB nejhorších výsledků, kde nejlepší hodnoty byly dosaženy u směsi PP+50%PB.

Při porovnání čistého PP a jednotlivých typů připravených směsí vyšlo najevo, že plněné směsi 25% a 50% PB vykazaly lepší vlastnosti než-li samotný PP.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Makromolekulární látky (polymery)* [online]. [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://www.gvi.cz/files/chemie/mml.pdf>
- [2] *ARGONA: Krátce z historie plastů* [online]. [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://www.argona.cz/DataStorage/File/KR%C3%81TCE%20Z%20HISTORIE%20PLAST%C3%9A.pdf>
- [3] ZMEKOVÁ, Marcela. *Mikrotvrdost polymerov.* Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [4] MLEZIVA, Josef. *Polymery: struktura, vlastnosti a použití.* Praha: Sobotáles, 1993, 528 s. ISBN 80-901570-4-1.
- [5] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití.* 2. vyd. Praha: VŠCHT Praha, 2006, 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [6] *WIKIPEDIE: Polypropylen* [online]. 2012 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>
- [7] *PETROLEUM: Polypropylen* [online]. 1999 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyroby/polypropylen.aspx>
- [8] *Permeation and Polymers* [online]. 2012 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: http://www.mecadi.com/en/literature_tools/encyclopedia/categorial/Thermoplastic/Polybutene_Polybutylene_PB/
- [9] *Tvrdost* [online]. [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Mikrotvrdost/uvod/uvod/uvodstr.htm>
- [10] PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech.* Vyd. 1. Praha : Nakladatelství technické literatury Alfa, 1989. 552 s.
- [11] DUŠEK, Jiří. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost - čisté kovy měřené metodou DSI.* Brno, 2008. 171 s. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [12] *MINERÁLY: Stupnice tvrdosti* [online]. 2006 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://www.minerals.cz/nabidka/mineraly/stupnice-tvrdosti>

- [13] *Zkoušky tvrdosti* [online]. 2010 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:FKa0Y4ynFp8J:ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%2520opory/nomd/zkousky%2520tvrdomi.doc+zkou%C5%A1ky+tvrdomi&hl=cs&gl=cz&pid=bl&srcid=ADGEESjuPVwi-OZTTucPVj9r-Sgyq5jiA2kHYR4Y57wrVi3v0DogxMFLD7c6qBUYbzDE3MtRK5YOOlKTmhvevitbNlPwsJ05BFXsGMS4Y9DSdIqVS9PaiQXPmUMmk0OGGHcnmWD2fYKL&sig=AHIEtbT9l3xihVmyIbjO7rNe3vXZ0JrcZQ>
- [14] *Zkoušky tvrdosti* [online]. 2007 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: http://www.spssol.cz/~vyuka/TRIDY/4.C/SPS/Zkousky_tvrdomi.pdf
- [15] *Brinell - tvrdost podle Brinella* [online]. 2002 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdom-brinell.htm>
- [16] *Zkoušky tvrdosti* [online]. 2011 [cit. 2012-02-17]. Dostupné z: <http://strojirenstviucivo.blogspot.com/2011/03/3312-zkousky-tvrdomi.html>
- [17] *Tvrdom (mikrotvrdom) – významná mechanická vlastnost materiálů* [online]. 2012 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tvrdom-mikrotvrdom>
- [18] *ZKOUŠKY TECHNICKÝCH MATERIÁLŮ: Zkoušky tvrdosti* [online]. 2011 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://alfa.ftp.ssto.cz/llzicar/Stroj%C3%ADrensk%C3%A1%20technologie%201%20ro%C4%8Dn%C3%ADk/Zkou%C5%A1ky%20technick%C3%BDch%20materi%C3%A1l%C5%AF/Zkou%C5%A1ky%20tvrdomi/>
- [19] *Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení* [online]. 2004 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [20] *Hodnocení mikrotvrdomi struktur materiálů* [online]. 2005 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Mikrotvrdom.pdf>
- [21] *Knoop Hardness Test* [online]. 2012 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: http://www.instron.us/wa/applications/test_types/hardness/knoop.aspx
- [22] VISELKA, Marek. *Meranie mikrotvrdomi polymérov*. Zlín, 2010. Diplomová práce.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	[mm ²]	Plocha otlaku
d	[mm]	Průměr vtisku
D	[mm]	Průměr kuličky
E _{IT}	[GPa]	Vtiskový modul pružnosti
EPDM		Terpolymer
EPM		Kopolymer etylenu a propylenu
F	[N]	Zatěžující síla
h	[mm]	Výška, do které se zkušební tělísko odrazí (Shoreho skleroskop)
H	[mm]	Výška, ze které bylo zkušební tělísko spuštěno (Shoreho skleroskop)
HB	[-]	Tvrdost podle Brinella
HDPE		Vysokohustotní polyetylen
H _{CH}	[-]	Tvrdost podle Brekoviče
H _{IT}	[MPa]	Vtisková tvrdost
HK	[-]	Tvrdost podle Knoop
HRA	[-]	Tvrdost podle Rockwella (diamantový kužel – zatížení 600N)
HRB	[-]	Tvrdost podle Rockwella (ocelová kulička – zatížení 1000N)
HRC	[-]	Tvrdost podle Rockwella (diamantový kužel – zatížení 1500N)
HV	[-]	Tvrdost podle Vickerse
l	[mm]	Výška trojúhelníku změřená na vtisku
L	[mm]	Délka dleší uhlopříčky
M _w	[-]	Molekulová hmotnost
PB		Polybuten
PE		Polyetylen
PP		Polypropylen

t	[mm]	Tloušťka měřeného materiálu
W	[kg]	Velikost zatížení jehlanu (Zkouška podle Brekoviče)
W _e	[μJ]	Elastická deformační práce
W _p	[μJ]	Plastická deformační práce
W _t	[μJ]	Totální deformační práce
ČSN		Česká technická norma
EN		Evropská norma

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Strukturní vzorec polypropylenu</i>	15
<i>Obr. 2. Stereochemiká struktura polypropylenu [7].....</i>	16
<i>Obr. 3. Strukturní vzorec polybutenu [8]</i>	19
<i>Obr. 4. Mohsova stupnice relativní povrchové tvrdosti [12]</i>	22
<i>Obr. 5. Zkouška tvrdosti podle Brinella [16]</i>	24
<i>Obr. 6. Zkouška tvrdosti podle Vickerse [17].....</i>	25
<i>Obr. 7. Zkouška tvrdosti podle Rockwella</i>	26
<i>Obr. 8. Poldi kladívko [18].....</i>	27
<i>Obr. 9. Baumannovo kladívko [19]</i>	28
<i>Obr. 10. Princip Shoreho skleroskopu.....</i>	29
<i>Obr. 11. Princip durokopu</i>	29
<i>Obr. 12. Geometrie Knoopova indentoru [21]</i>	32
<i>Obr. 13. Nástavec a měřící objektiv Hannemanova mikrotvrdoměru</i>	34
<i>Obr. 14. Schéma Bergsmannova mikrotvrdoměru.....</i>	34
<i>Obr. 15. Schéma Girschingova mikrotvrdoměru.....</i>	35
<i>Obr. 16. Mikrotvrdoměr PMT – 3.....</i>	36
<i>Obr. 17. Schéma a pohled na mikrotvrdoměr Durimet</i>	37
<i>Obr. 18. Vstřikovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advanced.....</i>	41
<i>Obr. 19. Přístroj pro měření mikrotvrdoměru - Micro Combi Tester.....</i>	42
<i>Obr. 20. Vtisková tvrdost při zatížení 0,5N.....</i>	43
<i>Obr. 21. Vtiskový modul pružnosti při zatížení 0,5N</i>	44
<i>Obr. 22. Tvrdost podle Vickerse při zatížení 0,5 N.....</i>	44
<i>Obr. 23. Creep při zatížení 0,5N.....</i>	45
<i>Obr. 24. Elastická deformační práce při zatížení 0,5N</i>	45
<i>Obr. 25. Plastická deformační práce při zatížení 0,5N</i>	46
<i>Obr. 26. Totální deformační práce při zatížení 0,5N.....</i>	46
<i>Obr. 27. Vtisková tvrdost při zatížení 1N.....</i>	47
<i>Obr. 28. Vtiskový modul pružnosti při zatížení 1N.....</i>	47
<i>Obr. 29. Tvrdost podle Vickerse při zatížení 1N.....</i>	48
<i>Obr. 30. Creep při zatížení 1N.....</i>	48
<i>Obr. 31. Elastická deformační práce při zatížení 1N</i>	49
<i>Obr. 32. Plastická deformační práce při zatížení 1N</i>	49

<i>Obr. 33. Totální deformační práce při zatížení 1N.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 34. Vtisková tvrdost při zatížení 5N.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 35. Vtiskový modul pružnosti při zatížení 5N.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 36. Tvrdost podle Vickerse při zatížení 5N.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 37. Creep při zatížení 5N.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 38. Elastická deformační práce při zatížení 5N.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 39. Plastická deformační práce při zatížení 5N.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 40. Totální deformační práce při zatížení 5N.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 41. Vtisková tvrdost směsi a čistého PP.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 42. Vtiskový modul pružnosti směsi a čistého PP.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 43. Tvrdost směsi a čistého PP podle Vickerse.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 44. Creep směsi a čistého PP.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 45. Elastická deformační práce směsi a čistého PP.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 46. Plastická deformační práce směsi a čistého PP.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 47. Totální deformační práce směsi a čistého PP.....</i>	<i>57</i>