

Vliv procesních parametrů na mikrotvrdost plněných polymerů

Petr Matocha

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 MATOCHA**

Osobní číslo: **T09443**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv procesních parametrů na mikrotvrdotost plněných polymerů**

Zásady pro vypracování:

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

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího BP

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Ovsík

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

13. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

25. května 2012

Ve Zlíně dne 13. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



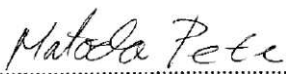

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

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 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 23. 05. 2012


.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce řeší problematiku mechanických vlastností především tvrdosti polymerů, které jsou ovlivněny pracovními teplotami formy.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. V první části práce je začleněna teoretická část, věnující se tvrdosti, tvrdoměry a polymeru. Druhá část práce je věnována praktické části. Praktická část obsahuje naměřené hodnoty a jejich výsledné statistické vyhodnocení.

Klíčová slova: Tvrdost, mikrotvrdost, polymer, tvrdoměry

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with the is me of mechanical properties of hardness, especially polymers, that are affected by forms of working temperature.

Bachelor thesis is divided into two parts. The first part is incorporated theoretical part dealing with the hardness, hardness of the polymer. The second part is devoted to the practical part. The practical part contains the measured values and them resulting statistical evaluation

Keywords: Hardness, microhardness, polymer, hardness tester

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Ovsíkovi za odbornou pomoc při řešení bakalářské práce.

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

ve Zlíně 23. 05. 2012

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ	12
2 POLYMERNÍ MATERIÁLY	13
2.1 CHEMICKÁ STRUKTURA POLYMERŮ	13
2.2 POLYPROPYLEN	15
2.2.1 Vlastnosti	15
2.2.2 Použití	15
2.2.3 Plniva	15
3 TVRDOST	17
3.1 ZKOUŠKY TVRDOSTI	17
4 STATICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI	19
4.1 ZKOUŠKA VRYPEM.....	19
4.2 ZKOUŠKA PODLE BRINELLA.....	20
4.3 ZKOUŠKA PODLE ROCKWELLA	21
4.4 METODA PRUŽNÉHO ODRAZU	22
5 MIKROTVRDOST	23
5.1 VOLBA ZATÍŽENÍ PRO ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI.....	23
5.2 PŘESNOST VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	24
5.3 ZKOUŠKA PODLE VICKERSE.....	25
5.4 ZKOUŠKA PODLE KNOOPA	26
5.5 ZKOUŠKA PODLE BERKOVIČE	27
6 TVRDOMĚRY	29
6.1 BAUMANNOVO KLADIVO	29
6.2 Kladívko POLDI	30
6.3 SHOREHO SKLEROSKOP.....	31
6.4 DUROSKOP.....	32
II PRAKTICKÁ ČÁST	33
7 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	34
8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
8.1 POLYPROPYLEN	37
8.1.1 Vlastnosti	37
8.1.2 Použití	37
8.1.3 Plniva	37
8.2 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	38
8.2.1 Vzorek PP+10% Grafitu.....	41
8.2.2 Vzorek PP+40% Mastku	48
8.3 DISKUSE VÝSLEDKŮ	53
ZÁVĚR	55
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	56

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	57
SEZNAM OBRÁZKŮ	59
SEZNAM TABULEK	61

ÚVOD

K základním důležitým mechanickým vlastnostem, které jsou využívány technické praxi, patří tvrdost. Mezi výhody při zkoumání tvrdosti patří relativní jednoduchost a možnost opakovatelnosti, kdy můžeme měření uskutečňovat přímo na vzorcích, polotovarech nebo na výrobcích.

Počátky měření tvrdosti jsou uváděny již od roku 1722, kdy tvrdost byla udána vrypem pomocí tyče s proměnlivou tvrdostí. Tuto metodu následně zdokonalil Friedrich Mohs. Tato zkouška měření byla nepřesná, a proto sloužila jako základ pro rozvoj měření tvrdosti.

V současné technické praxi jsou nejčastěji využívány metody vnikací, kde dochází ke vzniku otisku s přesně definovaným tvarem.

Mezi nejnovější metody patří metoda DSI (Depth Sensing Indentation). Princip metody spočívá ve studování plastických a elastických vlastností tenkých vzorků. Přístroj zaznamenává okamžitou hloubku vtiskovaného tělíska do vzorku, kdy je lineárně zatěžován a odlehčován. Výsledkem zkoušky je charakteristická křivka v závislosti na hloubce vtisku a zatížení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ

V současnosti člověk používá asi 80 tisíc různých materiálů. Zčásti to jsou materiály přírodního původu, jako je dřevo, kámen, kůže. Většina materiálů využívaných člověkem se v přírodě nenachází a je vyráběna technologickými postupy z vytěžených surovin (ropa, zemní plyn, kovy, křemík, hornin,...).

Mezi nejmodernější materiály patří kompozity, které cíleně kombinují vlastnosti svých často zcela odlišných složek.

V důsledku velkého počtu různorodých materiálů je nezbytné zavést vhodný systém jejich rozřazení. Materiály se dělí do čtyř hlavních skupin:

- 1. Materiály kovové:** Hlavní složkou jsou kovové prvky. Vyznačují se tvárností, houževnatostí, a kovovým leskem.
- 2. Materiály nekovové:** Do této skupiny patří oxidovaná skla, která bývají průhledná, křehká a poměrně tvrdá. Dále sem patří keramika, která se rovněž vyznačuje křehkostí a tvrdostí.
- 3. Materiály polymerní:** Tyto organické materiály se skládají z velkých molekul. Jsou tvořeny především z prvků uhlíku a vodíku. Jsou to materiály lehké, poměrně měkké a málo pevné, mají špatnou tepelnou odolnost.
- 4. Materiály kompozitní:** Jsou složeny ze dvou i více druhů materiálů, jejichž výhody v sobě kombinují a nevýhody potlačují. [1]

2 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Pod názvem polymer se označují přírodní i syntetické látky, skládající se z velkých molekul, které obsahují mnoho opakujících se shodných jednotek.

Z chemického hlediska jsou polymery nejčastěji sloučeniny uhlíku a vodíku, často obsahují také další prvky jako je například dusík, kyslík. Polymerní materiály vznikají z nízkomolekulárních sloučenin monomerů, při určitém typu polyreakce (polymerace, polyadice, polykondenzace).

Mezi charakteristické vlastnosti patří velmi malá hustota i tvrdost, v porovnání s kovy relativně malá pevnost v tahu a malá tepelná odolnost. Polymerní materiály jsou většinou elektrické izolanty. Kromě malé hustoty je velkou výhodou polymerů oproti kovům, sklům nebo keramice také relativně nízká energetická náročnost výroby. V porovnání s kovy jsou však polymery poměrně obtížně recyklovatelné.[1]

Polymerní materiály se dělí:

1. termoplasty
2. reaktoplasty
3. elastomery

Termoplasty: Za zvýšených teplot měknou a přecházejí do plastického stavu a za těchto podmínek je lze tvářet.

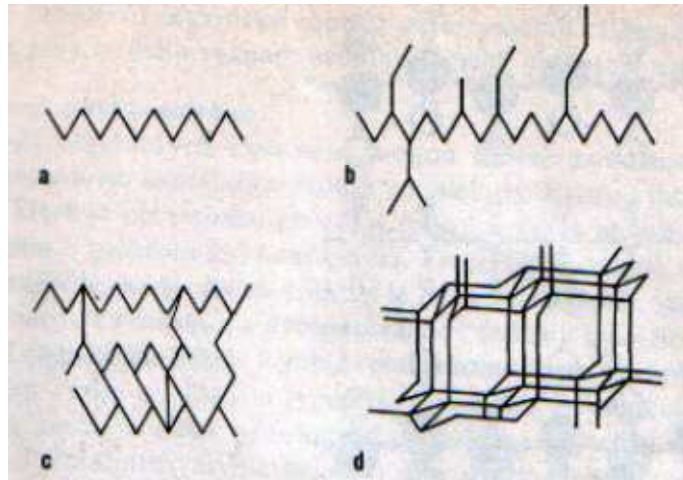
Reaktoplasty: Při zahřátí polotovaru, který má tvar budoucího výrobku, dojde k jeho vytvrzení, což je nevratná změna struktury. Výsledkem je tuhý a tvrdý materiál, který při opakovaným zahřátí neměkne, ani se netaví.

Elastomery: Materiály jsou schopné vytvářet velké deformace při mechanickém zatížení. Tato deformace je pružná, což znamená, že po odlehčení se materiál vrací do původního tvaru.[1]

2.1 Chemická struktura polymerů

Monomery jsou nízkomolekulární sloučeniny umožňující vzájemným spojováním dvou nebo několika vazebných míst ve svých molekulách vytvářet polymery. Jestliže monomer obsahuje pouze dvě místa (funkce) schopná vytvořit kovalentní chemickou

vazbu, vznikají polymery lineární. Při větším počtu funkcí mohou vznikat polymery rozvětvené nebo prostorově zasítované. [2]



Obr. 1 Tvary molekul polymerů (a) lineární

b) rozvětvený c) zesítovaný d) prostorově zesítovaný[7]

Základní stavební (monomer) jednotka stanovuje chemickou strukturu polymeru, která rozhoduje o jeho chemických, fyzikálních a mechanických vlastnostech. Základní jednotka není u všech polymerů totožná s chemickou strukturou monomerů.

Homopolymer je tvořen zpravidla z jednoho typu monomeru. Jeho základní stavební jednotka, charakterizující chemickou strukturu polymeru, je u všech shodná.

Kopolymery se skládají ze dvou nebo několika odlišných monomerů. Kopolymery se rozdělují podle umístění monomerních jednotek v makromolekulách na:

- statické AABABBABBBAAAB
- alternační ABABABABABABAB
- blokové AAAAABBBBAAAAA
- roubované B B
- B B
- AAAAAAAAAAAAAA

B

[2]

2.2 Polypropylen

Patří mezi polyolefiny. Jedná se o semikrystalický polymer s charakteristickou mléčně zakalenou barvou. Polymer je houževnatý, tuhý a lehčí než voda avšak tužší než polyethylén. Díky své střední molární hmotnosti se používá pro výrobu kopolymerů.

Pro zlepšení jeho mechanických vlastností se využívá plniva.

2.2.1 Vlastnosti

Charakterizuje jej dobrá rázová pevnost, která prudce klesá okolo 0°C. Podléhá creepu.

Mezi další nevýhody patří hořlavost, navlhavost, špatná povětrnostní odolnost, podléhá oxidaci a horší elektroizolační vlastnosti. Mezi výhody patří dobrá chemická odolnost, svařitelnost ale nelze jej lepit. Při záporných hodnotách teplot křehne.

2.2.2 Použití

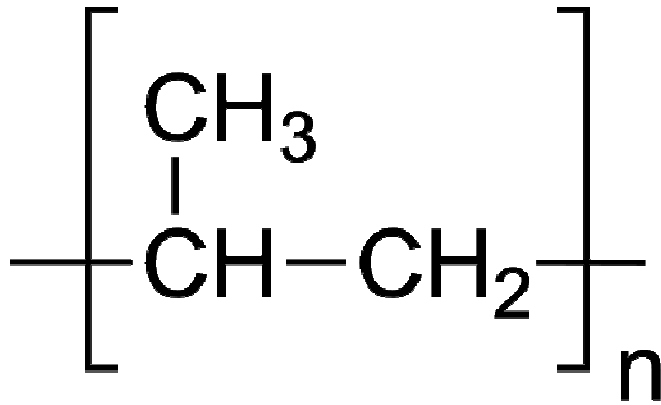
Polypropylen má široké uplatnění. Používá se ve strojírenském průmyslu pro výrobu lopatek do ventilátorů, vrtulí. V automobilovém průmyslu se používá pro klimatizační jednotky, přístrojové desky, nárazníky, víka zavazadlového prostoru. Další průmyslová odvětví se používá jako, injekční stříkačky, fólie a vlákna.

2.2.3 Plniva

Používají se k zlepšení mechanických vlastností. Nejpoužívanější plniva rozdělujeme do základních tří skupin:

- 1) **minerální plniva:** Jako přísady se používají jako vápenec, mastek, talek, křída apod. Vliv plniv na vlastnosti je ovlivněna dispergací plniv. Mezi výhody těchto plniv patří rostoucí modul pružnosti a snižuje se smrštění. K nevýhodám patří klesající tažnost.
- 2) **plniva na bázi kaučuku:** Používají se pro zvýšení houževnatosti. Mají nežádoucí vliv na modul pružnosti a krystalizaci - klesá
- 3) **Vlákna:** Zvyšují rozměrovou stálost a přesnost. Houževnatost je ovlivněna orientací, množstvím a soudržností vláken.

Na obrázku Obr.2 je popsán chemický vzorec polypropylenu.



Obr. 2 Chemický vzorec polypropylenu

Polypropylen se rozděluje na:

- 1) Izotaktický
- 2) Ataktický
- 3) syndiotaktický
- 4) kompozit

Izotaktický: s vyšším podílem izotaktických složek roste jeho finální vlastnosti.

Ataktický: je charakterizován dobrou pružností a měkkostí. Využívá se na plastické tmely

Syndiotaktický: je charakterizován vyšší houževnatostí a vysokou průzračností.

Nevýhodou je vysoká pořizovací cena.

Kompozit: zvyšuje mechanické vlastnosti a možnost použití.[10]

3 TVRDOST

Tvrdość je definována jako odolnost materiálu vůči vnikání jiného pevného tělesa. Je to vlastnost materiálu, která udává jeho schopnost odolávat trvalé plastické deformaci. Tedy vtisková tvrdość je definována jako odpor, vyvolaný materiálem, který klade proti vytvoření vtisku. Tvrdość poté hodnotití z velikosti trvalé deformace, kterou vtačováné cizí těleso v povrchu zkušéného vzorku vyvolá. Vnikající těleso nesmí podléhat plastickým deformacím, a proto musí vykazovat vysokou tvrdość. Při měření tvrdości dochází k vícerému namáhání měřeného vzorku, jsou výsledné hodnoty tvrdości ovlivněny celou řadou faktorů a výsledná tvrdość je tak ovlivněna komplexem mechanickým a fyzikálních vlastností.

Záleží na:

- elastických vlastnostech vzorku (modul pružnosti v tahu a ve smyku)
- plastických vlastnostech vzorku, zejména na mezi kluzu a na míře deformačního zpevnění vzorku
- velikosti zátěžové síly a rychlosti, kterou indenter vniká do vzorku

Je nutné vzít v úvahu, že stejný kov může mít různé hodnoty tvrdości v závislosti na:

- velikosti zrna (jemnozrné materiály vykazují větší tvrdość)
- Teplotě (s vyšší teplotou se vlivem roztažnosti stávají vazby méně pevné)
- množství cizí příměsí (snižují plastické deformace a zvyšují pevnost)
- vnitřní pnutí (vzniklé tvářením za studena atd. zvyšují pevnost)

Ze jmenovaných důvodů nelze charakterizovat tvrdość jako jednoznačnou fyzikální veličinu.[4,6]

3.1 Zkoušky tvrdości

Dle porušení povrchu

- Staticko – plastické (Brinell, Rockwell, Vickers)
- dynamicko – plastické (Poldi kladívko, Baumanovo Kladívko)
- dynamicko – elastické (Shoreho skleroskop, duroskop)

Staticko – plastické jsou nejrozšířenější zkoušky v oblasti laboratorního výzkumu. Další dvě skupiny zkoušek jsou používány ve výrobě, kde potvrzují kvalitu na požadovanou součástku.[4,6]

Dle velikosti zatěžující síly

- zkoušky makrotvrdomi – $2 \text{ N} < F < 30 \text{ kN}$
- zkoušky mikrotvrdomi – $2 \text{ N} > F; h > 200 \text{ nm}$
- zkoušky nanotvrdomi $h < 200 \text{ nm}$

Kde F značí maximální sílu, která lze dosáhnout v průběhu testu a h značí hloubku vytvořeného vtisku.[4]

Dle principu zkoušky

- **Vrypové:** tvrdým hrotem (obvykle diamantovým) se při malém zatížení vytvoří na broušeném povrchu zkoušeného materiálu vryp a podle šířky tohoto vrypu se následně určí tvrdost měřeného materiálu.
- **odrazové:** při této zkoušce se tvrdost měří podle velikosti odrazu závaží s kulovitě vybroušeným diamantovým hrotem, které dopadá z určité výšky na zkoušený předmět.
- **vtiskové:** Tvrdost se určuje z velikosti povrchu vtisku, způsobeného vnikajícím tělískem.

Tvrdost se posuzuje podle deformace za působení stálé síly nebo podle síly při stejné deformaci materiálu. Čím menší je odpor proti těmto deformacím, tím menšího zatížení je třeba k dosažení určité deformace, a tím menší tvrdost má zkoušené těleso.

Zkoušky tvrdosti jsou poměrně rychlé a dají se provést přímo bez další úpravy na předmětu, v některých případech lze získat přepočtem z jiné mechanické hodnoty např. pevnost. [4]

4 STATICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI

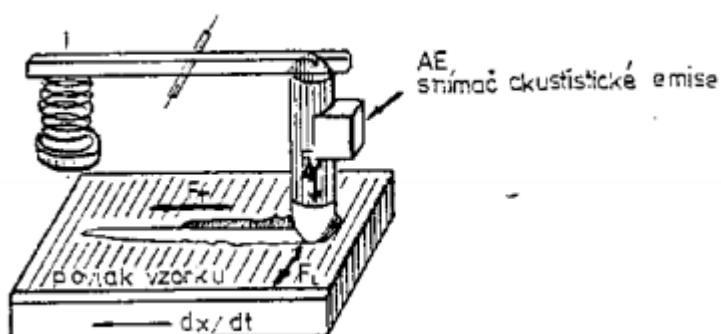
4.1 Zkouška vrypem

Tato zkouška patří mezi nejstarší způsoby zkoušení tvrdosti a její princip byl převzat z mineralogie, kde se ke klasifikaci tvrdosti užívá tzv. Mohseovy stupnice tvrdosti. V stupnici je seřazeno deset nerostů, z nichž každý je schopen vyrýt vryp.

Tab. 1. Sestavení nerostů podle Mohseovy
stupnice tvrdosti[2]

stupeň	referenční nerost	stupeň	referenční nerost
1.	Mastek	6.	Živec
2.	Sůl kamenná	7.	Křemen
3.	Vápenec	8.	Topas
4.	Kazivec	9.	Korund
5.	Apatit	10.	Diamant

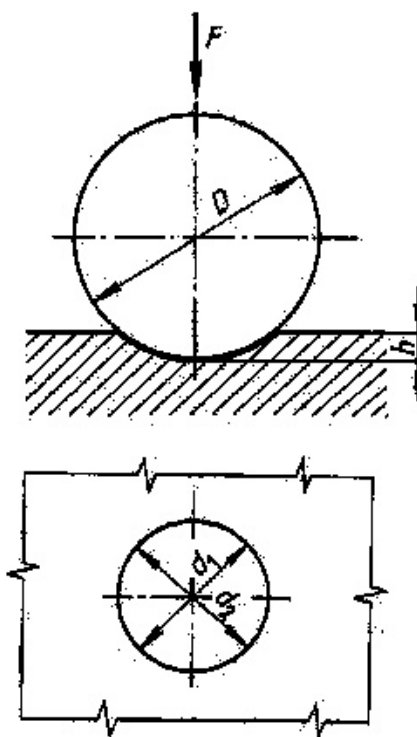
Tyto stupně tvrdosti jsou však příliš hrubé. Zkušebním tělískem je broušený diamant, upevněný ve dvojramenné páce, který má hrot ve tvaru kužele. Diamant se postupně zatěžuje, aby se při pohybu stolu se vytvořil na vzorku vryp o šířce 0,01 mm. Jiný způsob je ten, že se měří šířka vrypu.



Obr. 3 Martensův přístroj k vrypové zkoušce tvrdosti [2,3]

4.2 Zkouška podle Brinella

Zkouška podle Brinella patří ke zkouškám tvrdosti na principu vtiskovém. Vtiskovaným předmětem je u této zkoušky kulička průměru D , na niž působí zatížení, kterým se vtláče kulička do zkoušeného materiálu. Po odlehčení se změří průměr vtisku d a stanoví se z něho tvrdost. [4]



Obr. 4 Zkouška dle Brinella[8]

Průměr kuličky bývá 1 mm, 2,5 mm, 5 mm, 10 mm. Průměr kuličky závisí na tloušťce měřeného materiálu. Platí, že minimální tloušťka je desetinásobek hloubky vtisku. V opačném případě by se mohla projevit tvrdost podložky.[5]

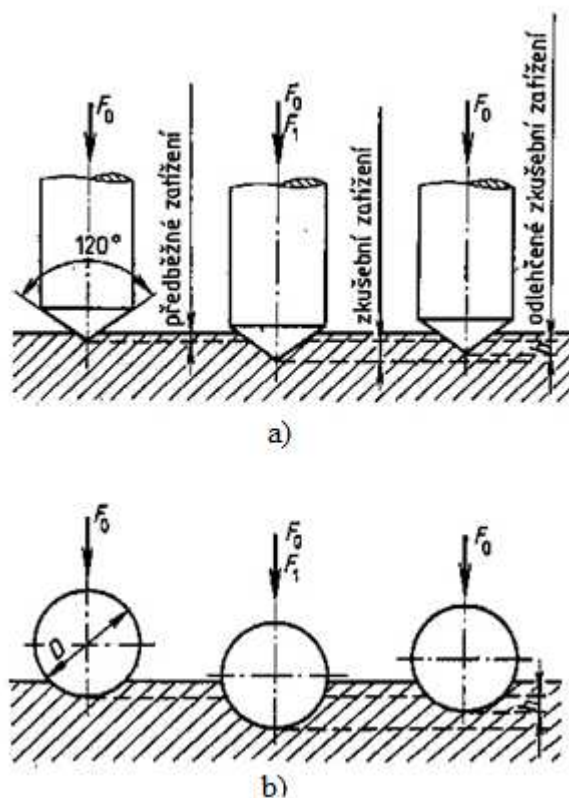
Doba působení síly o dané velikosti závisí na struktuře materiálu. Měkčí materiály se zatěžují delší dobu. U slitin železa je zatížení od 10 do 15 s. U neželezných slitin od 10 do 180 s.[5]

Přesnost měření závisí na správném proměření vtisku. U Brinellovy zkoušky je měření vtisku poměrně nepřesné. Vtisk bývá někdy nezřetelný a nesouměrný. Na průměr vtisku má velký vliv i vtažení materiálu po kraji vtisku (u materiálu nezpevněného) nebo naopak vytlačení obvodového valu (u materiálu zpevněného). Příčinou další chyby je

deformace použité vtačované kuličky (je z kalené oceli). Pro materiály tvrdší než HB=400 není ocelová kulička vhodná a používají se kuličky ze slinutých karbidů. [5]

4.3 Zkouška podle Rockwella

Princip zkoušky je založen na postupném vtačování vnikacího tělesa do povrchu zkušebního tělesa a následným změřením hloubky vtisku. Vnikacím tělesem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° nebo kulička z tvrdokovu s průměrem 3,175 nebo 1,585 mm. Zatížení při zkoušce se skládá z předběžného o velikosti 98,07 N a přídavného, které je různé dle stupnice tvrdosti. [8]



Obr. 5 Zkouška podle Rockwella (a) diamantový kužel b) kulička) [5]

Kuličku nebo diamantový kužel, dotýkající se povrchu zkoušeného tělesa, zatížíme předběžnou silou. Následně sílu zvolna zvětšujeme o přídavné zatížení, až dosáhneme zatížení předepsané danou normou. Pak přídavné zatížení odlehčujeme na předběžné zatížení a zjistíme hloubku vtisku. Tvrdost se vypočítá podle Rockwellova vzorce. [5]

Metoda je vypracována pro sériové kontrolní zkoušky kalených, zušlechťovaných nebo jinak tepelně zpracovaných ocelí. Hodnoty tvrdosti podle Rockwella nelze převést na jiné tvrdosti nebo pevnost v tahu. [5]

4.4 Metoda pružného odrazu

Tato metoda je založena na měření tvrdosti pomocí pružného odrazu tělíška, padajícího s určité výšky. Část energie se spotřebuje na vytvoření trvalých deformací na zkoušeném předmětu a zbylá část energie způsobí pružnou deformaci a tím způsobí odraz tělíška.

Vliv na odrazivost tělíška má vliv:

- **Tvar hrotu padajícího tělíška**
- **Velikost dopadové energie**
- **Velikost zkoušeného předmětu**

Na tomto principu jsou založeny tvrdoměry skleroskopy a duroskopy. Tímto způsobem získané hodnoty tvrdosti jsou značně nespolehlivé a slouží jako orientační.[2,3]

5 MIKROTVRDOST

V tomto případě je prováděno vtlačování tělesa do povrchu zkoušeného tělesa v rozsahu od 1 g do 1000g. Tyto zkoušky nalezy uplatnění převážně při měření:

- velmi malých a tenkých předmětů
- křehkých materiálů
- vrstev chemicko-tepelného zpracování
- hodnocení svarových spojů
- kovových nebo anorganických povlaků[4,6]

5.1 Volba zatížení pro zkoušky mikrotvrdosti

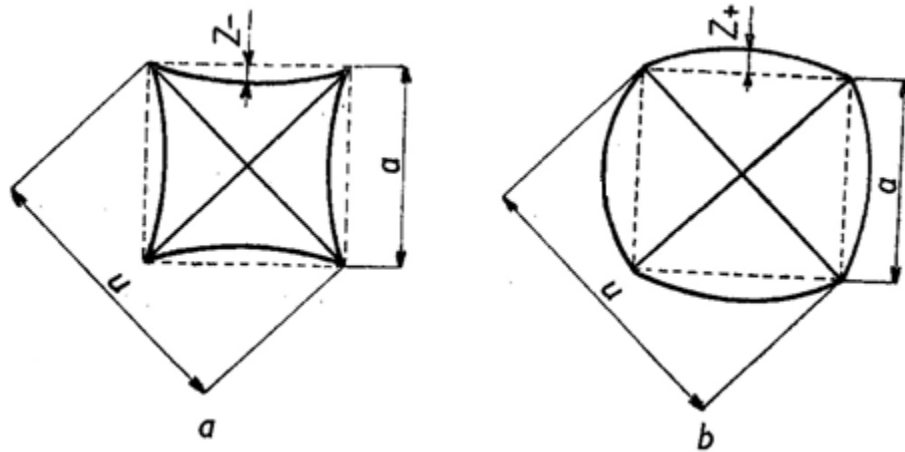
Pro zjednodušení volby zatížení pro zkoušku, jsou vytvořeny tabulky, kde lze odečíst maximální povolené zatížení pro určitou tvrdost a rozměry zkoušeného předmětu. [3]

Tab. 1 Největší přípustné zatížení pro určitou velikost součásti [2]

Velikost součásti v μ	Největší přípustné zatížení v g.		
	Struktura měkká	Struktura polotvrdá	Struktura tvrdá
10	0,17	0,69	1,5
50	0,85	3,40	7,7
100	1,7	6,9	15,0
300	5,1	20,0	46,0
500	8,5	34,0	77,0
1000	17,0	68,0	154,0
2000	34,0	137,0	309,0
4000	68,0	274,0	618,0
10000	171,0	688,0	1546,0
20000	343,0	1374,0	3090,0

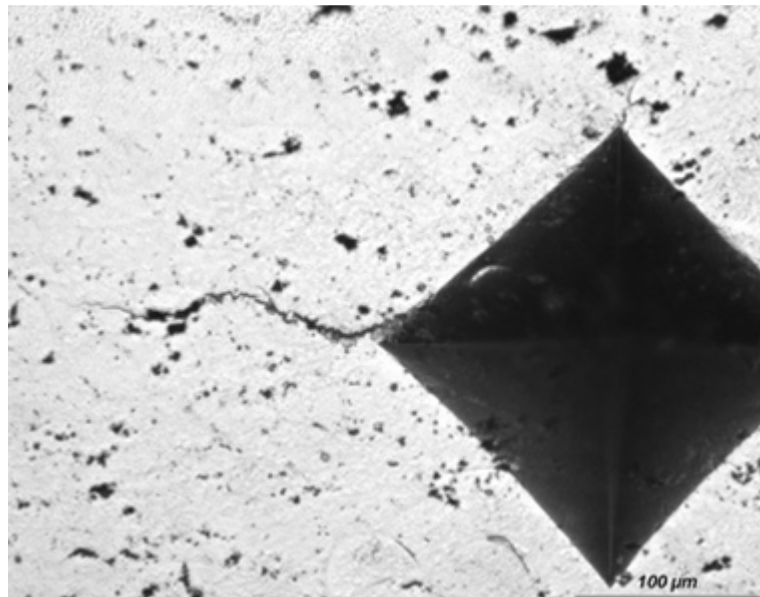
5.2 Přesnost výsledků měření

Při měření může docházet k chybám, které mohou být způsobeny např. nesprávnou volbou zkušebního zatížení nebo nepřesným provedením zkušebního tělíska. Tvar vtisku nejvíce ovlivňuje struktura materiálu, která jej může deformovat.



Obr. 6 Deformace vtisku a) nezpevněný materiál b) zpevněný materiál [2]

Někdy může docházet u méně houževnatých materiálů ke vzniku trhlinek na okrajích vtisku. Tyto trhlinky vznikají překročením mezi pevnosti a jsou krajně nepříznivé k přesnému měření. [2,3]



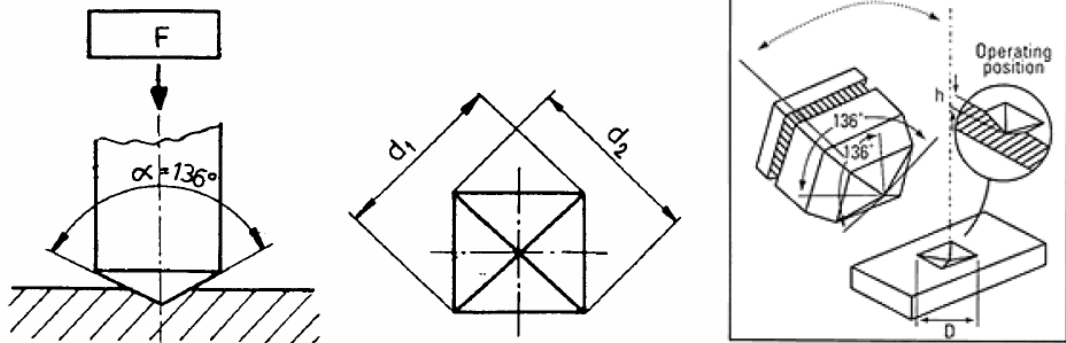
Obr. 7 Trhlinka v oblasti vtisku Vickersova jehlanu [11]

5.3 Zkouška podle Vickerse

Při zkoušce se vtlačuje diamantové těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° . K určení tvrdosti se měří úhlopříčka vtisku, která vznikne po odlehčení zkušební tělesa. Zkušební zatížení je voleno podle typu a rozsahu použití. [5;6]

Tab. 2 Typy zkoušek a rozsahy použití [6]

Označení	Symbol tvrdosti HV	Zkušební zatížení [N]
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	$\geq HV 5$	$F \leq 49,03$
Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení	HV 0,2 a6 HV 5	$1,961 \leq F \leq 49,03$
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	$HV 0,01 < HV 0,2$	$0,09807 \leq F \leq 1,961$



Obr. 8 Zkouška dle Vickerse [6]

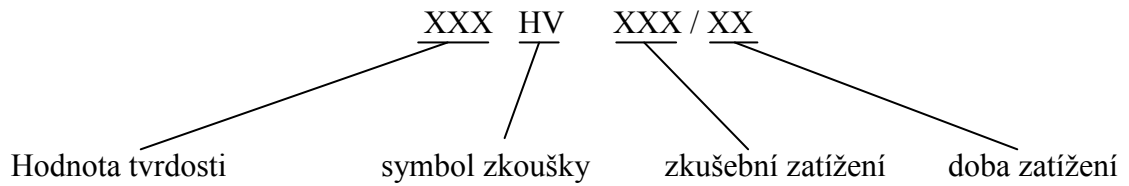
Tvrdot podle Vickerse je definována podílem zatížení a povrchu vtisku.

$$HV = \frac{\text{zkušební zatížení}}{\text{povrch vtisku}} = [MPa]$$

kdy povrch vtisku je dán ze vztahu

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

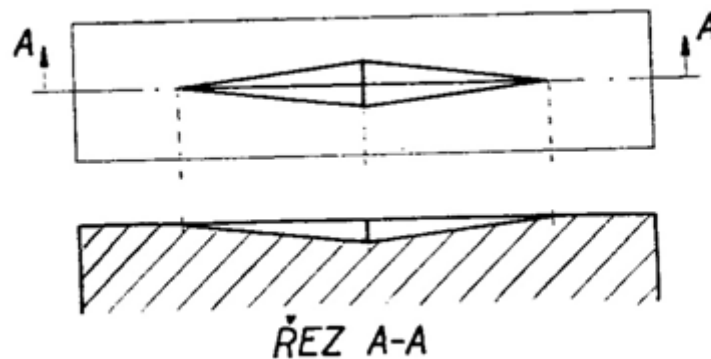
Tvrdot podle Vickerse se značí symbolem HV. Za symbol se udává hodnota velikosti zkušebního zatížení a doba působení zatížení.



Tato metoda je přesná a hodnoty tvrdosti se nemění při různých zatížení oproti Brinellově metodě. Nevýhodou u této metody je, že hodnoty tvrdosti nelze převádět na jiné tvrdosti nebo pevnosti. [5]

5.4 Zkouška podle Knoop

Při určování tvrdosti podle Knoop je vtlačované těleso vybroušeno tak, aby vytvářel kosodélníkové vtisky. Vtisk je vytvořen dvěma úhlopříčkami v poměru 7,11:1. Pro vyhodnocení tvrdosti se měří delší úhlopříčka. [3]



Obr. 9 Vzhled vtisku dle Knoop [2]

Tvrdot je definována poměrem zkušebního zatížení k ploše vtisku.

$$HK = \frac{F}{S} = \frac{F \cdot k_1}{l^2 \cdot k_2} \quad (2)$$

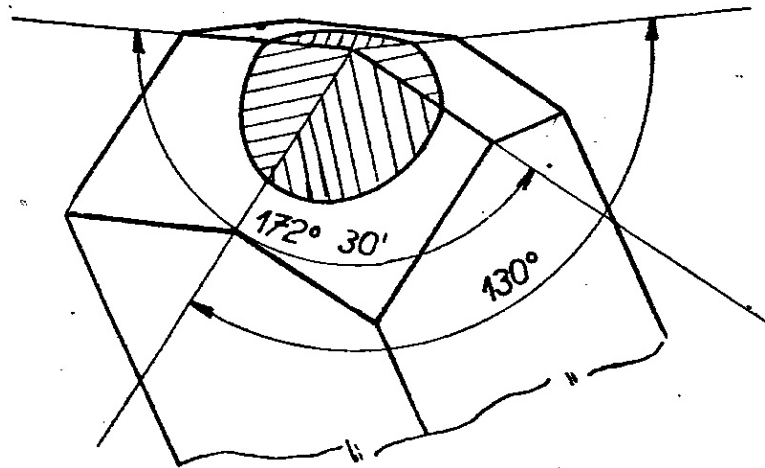
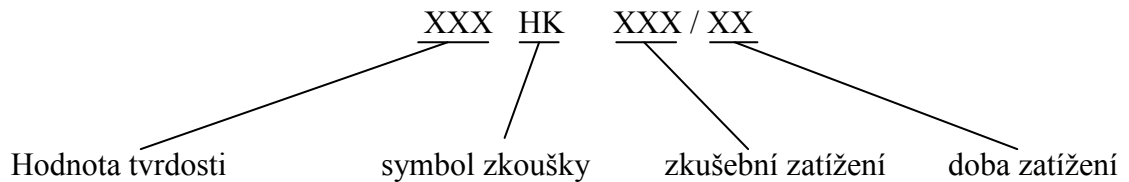
kde:

F zkušební zatížení

S plocha vtisku

l	délka úhlopříčky
k_1	korekční faktor daný cejchováním rozměrů použitého tělíska
k_2	konstanta pro přepočet délky úhlopříčky na plochu vtisku

Tvrдость podle Knoop se značí symbolem HK. Za symbol se udává velikost zatížení a doba působení.



Obr. 10 Tvar diamantového jehlanu podle Knoop [2]

Výhodou u této metody je velmi plytký vtisk, díky kterému je umožněno zkoumat jemné dráty a plechy, součásti povrchově kalených nebo nitridovaných a velmi drobných součástí. Dále se využívá ke zkoušení tvrdosti křehkých látek, které se při jiných metodách tříští (sklo, porcelán,...). Další výhodou je tvar diamantu, který umožňuje velmi přesná měření, neboť materiál se na konci dlouhé úhlopříčky nevzdouvá ani nepropadá.

Mezi nevýhody patří jakost povrchu zkoušeného vzorku, kdy povrch musí být velmi pečlivě vybroušen a vyleštěn. Jelikož vtisk nelze přesně proměřit.[3]

5.5 Zkouška podle Berkoviče

Hlavní důvod pro zavedení této zkoušky byly problémy s výrobou čtyřbokého Vickersova jehlanu a dodržení podmínek sbíhavosti. U trojbokého jehlanu tato podmínka odpadá.

Metoda pracuje na podobném principu jako metoda Vickersova. Rozdíl je ve vtačováním tělísku. Tělísko je trojboký jehlan s úhlem 65° mezi bočními stěnami a výškou. Vnikací tělísko díky svému geometrickému tvaru, je méně citlivý na rázy a na neopatrné zacházení.[3]

Tvrдост je definována vztahem:

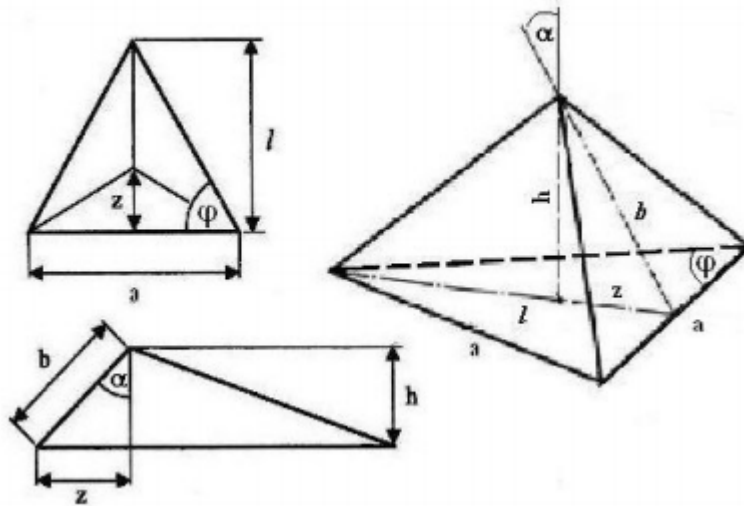
$$H_{ch} = 1570 \frac{F}{l^2} \quad (3)$$

Kde:

F zkušební zatížení

l výška změřená na trojúhelníkovém vtisku

Tato metoda se využívá pro měření tvrdosti velmi malých součástek a pro nanoindentačních zkouškách.



Obr. 11 Schéma tříbokého jehlanu

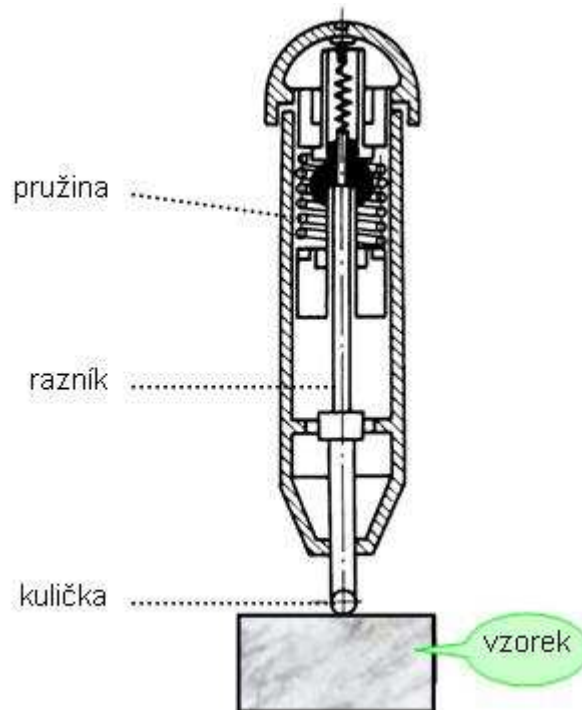
6 TVRDOMĚRY

Zkoušky tvrdosti se provádějí na přístrojích tzv. tvrdoměrech. Tyto stroje se skládají zpravidla ze tří částí:

1. Stojanu, s vedením indentoru a stolkem pro uložení zkoušeného vzorku.
2. Zařízení pro vyvození síly
3. Zařízení pro měření vtisku [3]

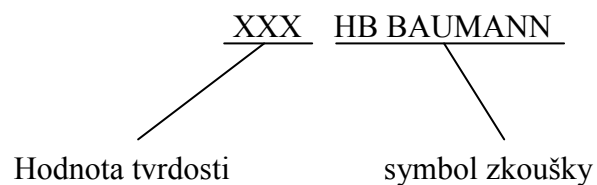
6.1 Baumannovo kladivo

Princip tvrdoměru je založen na vtlačování ocelové kuličky do zkoušeného materiálu pomocí úderem úderníku, který je vyvolán odjištěním stlačené pružiny. Po vytvoření vtisku se změří pomocí lupy vtisk a hodnota tvrdosti je vyhledána v tabulkách. Výhodou kladívka je, že není nutné používat etalon, protože síla úderníku je stejná. [3,5]



Obr. 12 Baumannovo Kladivo

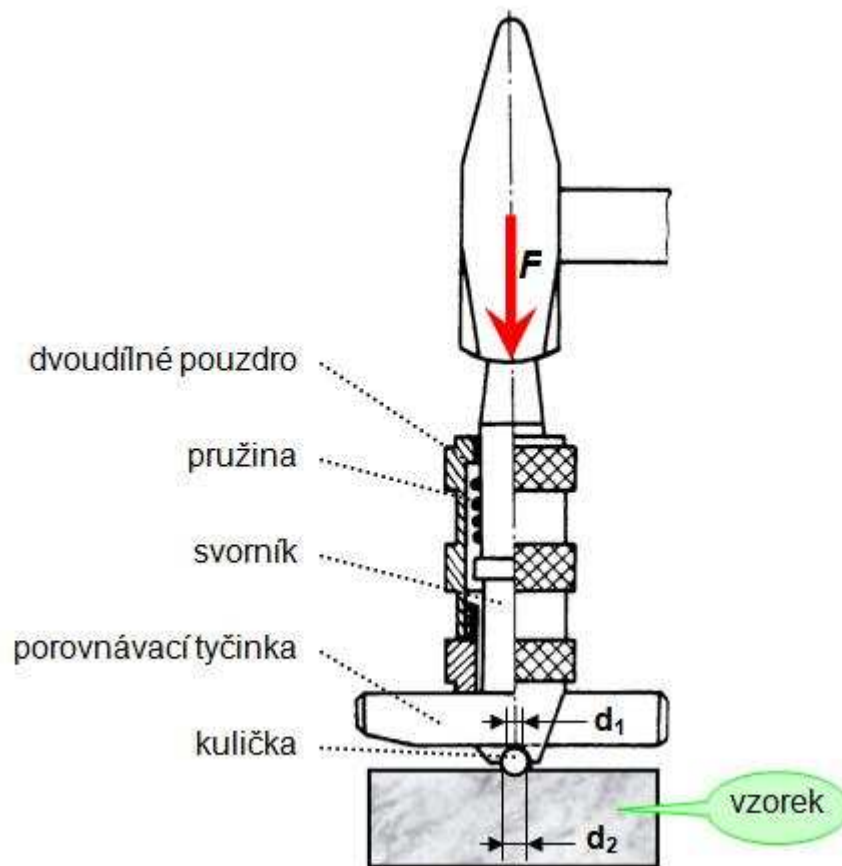
Tvrдость se značí symbolem HB BAUMANN za naměřenou hodnotu



6.2 Kladívko Poldi

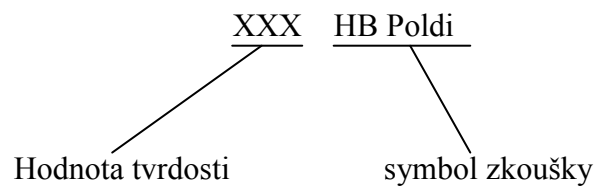
Principem tvrdoměru je porovnání tvrdosti porovnávací tyčinky a zkoušeného materiálu.

Tvrdoměr položíme na zkoušený materiál a kladívkem udeříme na úderník. Ocelová kulička díky rázu vytvoří vtisk do zkoušeného materiálu a do standardní tyče. Pro vyhodnocení tvrdosti se změří oba vtisky pomocí lupy. Podle velikosti vtisků a známé tvrdosti tyčky se pomocí tabulek zjistí tvrdost materiálu.[3,5]



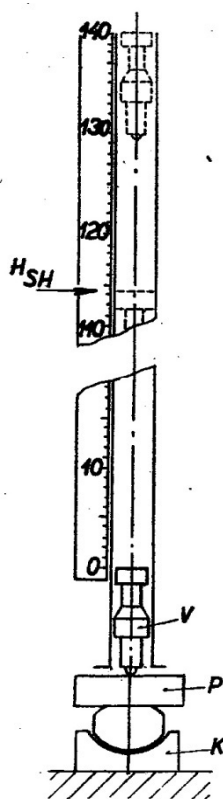
Obr. 13 Kladívko Poldi

Tvrdost se značí symbolem HB Poldi za naměřenou hodnotu



6.3 Shoreho skleroskop

Přístroj se skládá z průhledné trubičky a tělíska o přibližné hmotnosti 2,5g, zakončeným kulovitě zabroušeným diamantem. Za trubičkou je umístěna stupnice pro odečítání tvrdosti. Tělísko je pomocí balónku (podtlaku) vytaženo do počáteční polohy, kde je ukotveno v čelistech. Po uvolnění z čelistí padá tělísko volně na zkoušený předmět, kde po nárazu na povrch tělesa odskočí a následně se zjistí tvrdost. [3]



Obr. 14 Skleroskop

V- zkušební tělísko

P- zkoušený předmět

K – podložka [3]

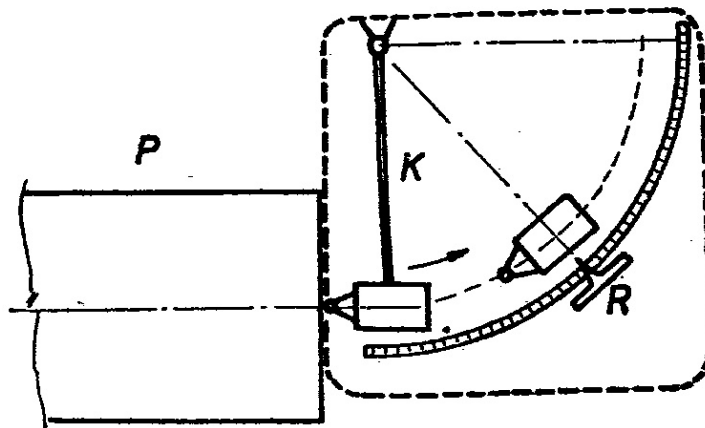
Povrch zkoušeného předmětu musí být hladký. Čím má těleso větší tvrdost, tím se zkušební tělísko odrazí výše. Pro správnost měření musí zkoušené tělísko dopadat kolmo na zkoušený předmět. Pokud je zkoušený předmět šikmý nebo oblý, využívá se k měření podložek.

Při dopadu zkušebního tělíska na zkoušený povrch dochází ke zpevnění povrchových vrstev materiálu, které by mohly zkreslit měření. Proto se nesmí měřit dvakrát stejné místo.

Tvrdoměr se používá pro měření tvrdosti tvrzených válců nebo pro zjišťování tvrdosti velmi tenkých vrstev (nitridování,...).[3]

6.4 Duroskop

Přístroj se skládá z kladívka upevněného na čepu a volném konci opatřený ocelovou kuličkou. Princip durokopu je založen na uvolnění kladívka z určité výšky, které při odrazu vezme sebou vlečnou ručičku, která ukáže výšku odrazeného kladívka. Hodnota je následně odečtena ze stupnice. Stupnice udává přímo tvrdost zkoušeného předmětu.



Obr. 15 Schéma durokopu, *P* – zkoušený předmět

K – kladívko, *R* – vlečná ručička [2]

Při měření durokopem jsou hodnoty nepřesné a slouží jako orientační, neboť chyby při měření jsou velké, které mohou být zapříčiněny například opotřebenou dopadovou ploškou. [2,3]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je zjištění vlivu pracovní teploty formy na mechanické vlastnosti především mikrotvrdomosti. Pro experiment byly použity vzorky polypropylenu s příměsí 10% grafitu a polypropylen s příměsí 40% mastku. Vzorky byly připravovány metodou vstříku do formy o pracovních teplotách 40; 60; 80 a 100°C. Na daných vzorcích byla zkoušena tvrdost metodou DSI.

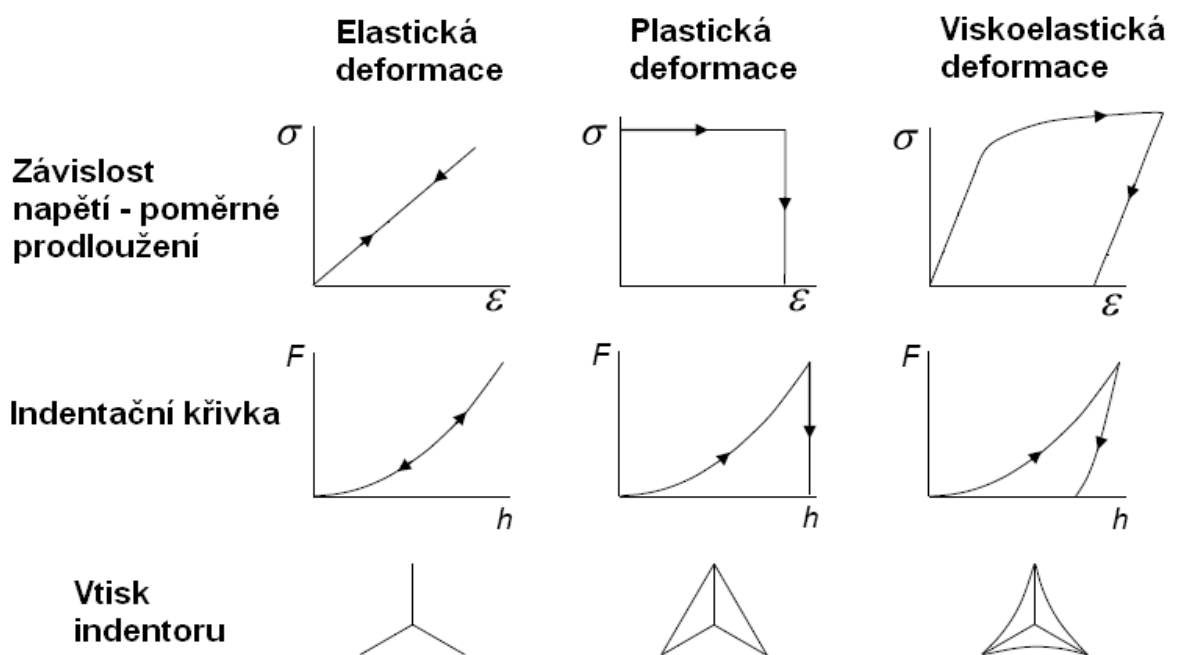
Dalším cílem bakalářské práce je určit nejvýhodnější teplotu pro zpracování daných vzorků.

Postup pro vypracování bakalářské práce:

1. Vypracování teoretické části
2. Volba a příprava zkušných vzorků
3. Provedení experimentálního měření
4. Statistické vyhodnocení naměřených hodnot

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Měření mikrotvrdomosti bylo realizováno na přístroji Micro Combi Testeru od firmy CSM Instruments. Při experimentu jsme aplikovali 10 indentací na zkoušený materiál, který byl vstřikován na vstřikovací stroji Arburg Allrounder 420C do formy o pracovní teplotě 40; 60; 80 a 100°C. Na vzorek jsme působily maximálním zatížením 1N s výdrží 90s. Zatěžující a odtěžující rychlost byla použita 2 N/min. Poissonovo číslo bylo použito 0,3 z důvodu, že nebylo možné změřit jeho hodnotu u testovaných zkušebních těles.



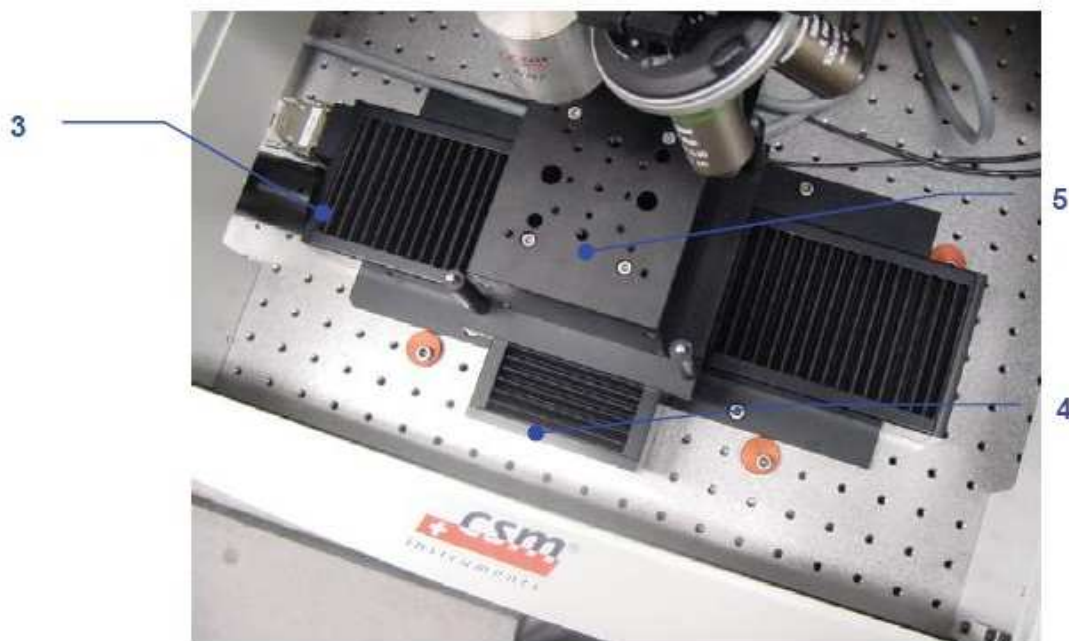
Obr. 16 Indentační křivky

Obr. 16 popisuje indentační křivky, kdy elastická deformace popisuje chování materiálů (např. pryžových) při zkoušce tvrdosti, kde dochází k výrazné relaxaci materiálu po odlehčení indentoru. Plastická deformace popisuje chování materiálů (např. kovů) během zkoušek tvrdosti, kdy nedochází k relaxaci materiálu. Viskoelastická deformace popisuje chování materiálu (např. termoplastů) během zkoušky tvrdosti, kdy po odlehčení indentoru materiál částečně relaxuje.



Obr. 17 Tvrdoměr MICRO-COMBI TESTER

(1 - měřicí hlava; 2 – univerzální držák; 5 – posuv; 6 – optický mikroskop; 7 – modulová hlava; 8 – anti-vybrační stojan; 9 – optický senzor; 10 kryt stolu)



Obr. 18 Tvrdoměr MICRO-COMBI TESTER

(3 – posuv osa X; 4 – posuv osa Y; 5 – posuv osa Z)

8.1 Polypropylen

Patří mezi polyolefiny. Jedná se o semikrystalický polymer s charakteristickou mléčně zakalenou barvou. Polymer je houževnatý, tuhý a lehčí než voda avšak tužší než polyethylén. Díky své střední molární hmotnosti se používá pro výrobu kopolymerů.

Pro zlepšení jeho mechanických vlastností se využívá plniva.

8.1.1 Vlastnosti

Charakterizuje jej dobrá rázová pevnost, která prudce klesá okolo 0°C. Podléhá creepu.

Mezi další nevýhody patří hořlavost, navlhavost, špatná povětrnostní odolnost, podléhá oxidaci a horší elektroizolační vlastnosti. Mezi výhody patří dobrá chemická odolnost, svařitelnost ale nelze jej lepit. Při záporných hodnotách teplot křehne.

8.1.2 Použití

Polypropylen má široké uplatnění. Používá se ve strojírenském průmyslu pro výrobu lopatek do ventilátorů, vrtulí. V automobilovém průmyslu se používá pro klimatizační jednotky, přístrojové desky, nárazníky, víka zavazadlového prostoru. Další průmyslová odvětví se používá jako, injekční stříkačky, fólie a vlákna.

8.1.3 Plniva

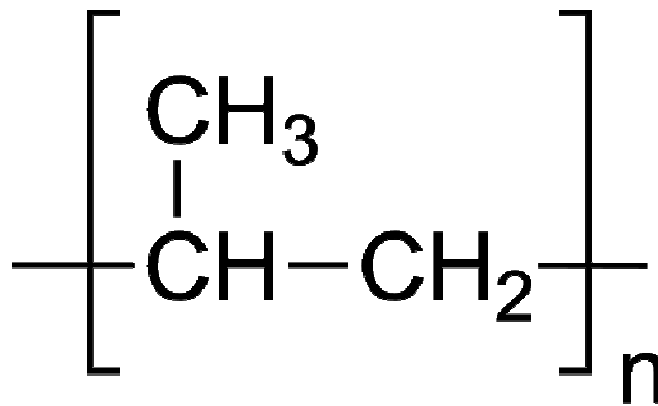
Používají se k zlepšení mechanických vlastností. Nejpoužívanější plniva rozdělujeme do základních tří skupin:

1. **Minerální plniva:** Jako přísady se používají jako vápenec, mastek, talek, křída apod. Vliv plniv na vlastnosti je ovlivněna dispergací plniv.

Mezi výhody těchto plniv patří rostoucí modul pružnosti a snižuje se smrštění. K nevýhodám patří klesající tažnost.

2. **Plniva na bázi kaučuku:** Používají se pro zvýšení houževnatosti. Mají nežádoucí vliv na modul pružnosti a krystalizaci - klesá
3. **Vlákna:** Zvyšují rozměrovou stálost a přesnost. Houževnatost je ovlivněna orientací, množstvím a soudržností vláken.

Na obrázku 19. je popsán chemický vzorec polypropylenu.



Obr. 19 Chemický vzorec polypropylenu

Polypropylen se rozděluje na:

1. Izotaktický
2. Ataktický
3. Syndiotaktický
4. Kompozit

Izotaktický: s vyšším podílem izotaktických složek roste jeho finální vlastnosti.

Ataktický: je charakterizován dobrou pružností a měkkostí. Využívá se na plastické tmely

Syndiotaktický: je charakterizován vyšší houževnatostí a vysokou průzračností.

Nevýhodou je vysoká pořizovací cena.

Kompozit: zvyšuje mechanické vlastnosti a možnost použití.

8.2 Vyhodnocení experimentu

Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Hodnoceny byly:

- | | | |
|-----------------------------|----------|-------|
| 1. Vtisková tvrdost | H_{IT} | [MPa] |
| 2. Redukovaný modul | E_r | [GPa] |
| 3. Komplexní modul | E^* | [GPa] |
| 4. Vtiskový modul pružnosti | E_{IT} | [GPa] |
| 5. Creep | C_{IT} | [%] |

6. Tvrlost dle Vickerse	HV	[Vickers]
7. Elastická deformační práce	We	[pJ]
8. Plastická deformační práce	Wp	[pJ]
9. Celková deformační práce	W _{total}	[pJ]

Vtisková tvrdost

Udává míru odolnosti proti trvalé deformaci nebo poškození a lze ji vyjádřit z následující rovnice:

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A_p} \quad (4)$$

kde: F_{\max} je maximální síla
 A_p je průmět kontaktní plochy (teoretická nebo kalibrovaná)
 H_{IT} vtisková tvrdost

Redukovaný modul

je definován z následující rovnice:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} \cdot S_t}{2 \cdot \beta \sqrt{A_p} (H_c)} \quad (5)$$

kde: S_t je vtisková tuhost
 A_p je průmět kontaktní plochy (teoretická nebo kalibrovaná)
 E_r redukovaný modul
 H_c hloubka vtisku

Komplexní modul

lze vyjádřit z následující rovnice:

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} [GPa] \quad (6)$$

Kde:	E_i	elastický modul pružnosti indentoru
	E_r	redukovaný modul
	ν_i	Poissonova konstanta indentoru
	E^*	Komplexní modul

Vtiskový modul

pro výpočet používá komplexní modul, který ve výpočtu využívá Poissonovu konstantu pro vzorek.

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (7)$$

kde:	E^*	komplexní modul
	ν_s	Poissonova konstanta vzorku
	E_{IT}	vtiskový modul

Creep

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (8)$$

kde:	h_1	hloubka vtisku dosaženého zkušební silou (je udržována konstantě)
	h_2	hloubka vtisku během průběhu zkoušky konstantní silou
	C_{IT}	Creep

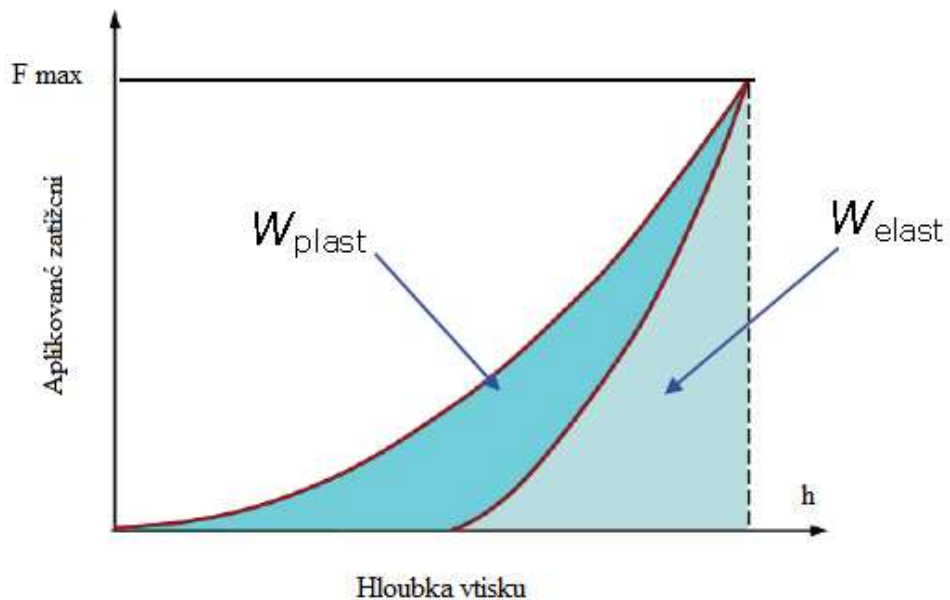
Celková deformační práce

lze definovat z následující rovnice:

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \quad (9)$$

kde: W_{plast} práce plastická

W_{elast} práce elastická



Obr. 20 Deformační práce (W_{plast} – práce plastická,
 W_{elast} – práce elastická)

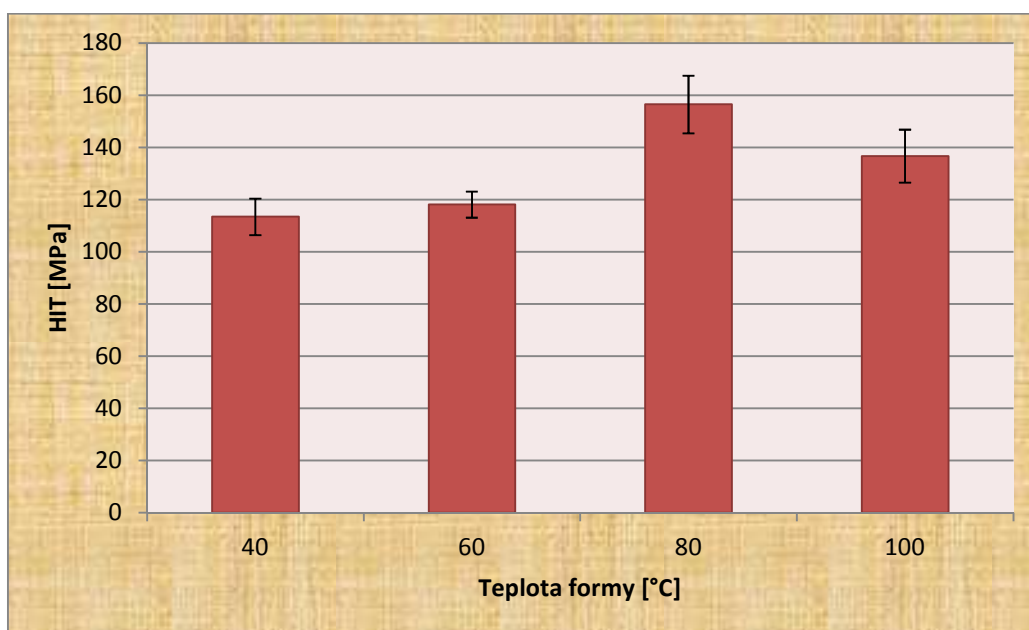
8.2.1 Vzorek PP+10% Grafitu

Vzorek byl vstřikován do formy o pracovní teplotě 40; 60; 80 a 100°C. Posléze jsme na vzorek působily maximálním zatížením 1N s výdrží 90s. Jeho naměřené zprůměrované hodnoty jsou zobrazeny v tabulce Tab. 3.

Tab. 3 Naměřené hodnoty PP+10% Grafitu

	40°C	60°C	80°C	100°C
HIT (MPa)	113,413	118,116	156,457	136,680
EIT (GPa)	2,148	2,425	3,337	2,784
Er (GPa)	2,355	2,659	3,655	3,051
E* (GPa)	2,360	2,665	3,667	3,059
Creep (%)	12,221	12,189	12,970	11,536
HV (Vickers)	10,704	11,149	14,768	12,901
We (pJ)	2497326,942	2522557,712	2332526,865	2458216,330
Wp (pJ)	6472833,028	6452003,552	5812217,775	6022145,432
Wtotal (pJ)	8970159,970	8974561,264	8144744,637	8480361,760

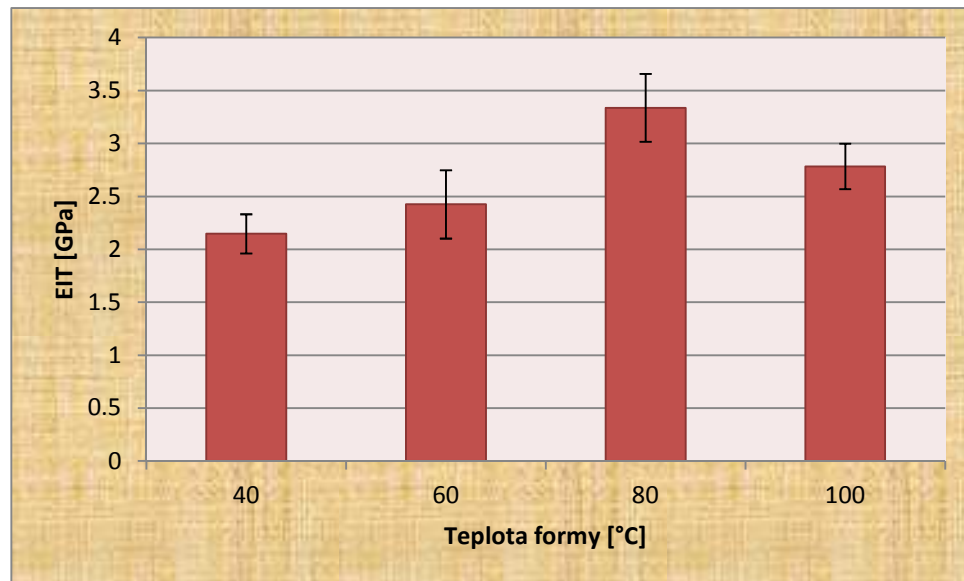
- **Vtisková tvrdost**



Obr. 21 Vtisková tvrdost PP+10% Grafitu

Při instrumentované zkoušce mikrotvrdosti byla naměřena nevyšší hodnota Vtiskové tvrdosti u vzorků vstříkovaných při teplotě vstříkovací formy 80°C (156,457 MPa) jak můžeme vidět na Obr. 21. U vzorku, který byl vstříkován při pracovní teplotě formy 40°C, byla zjištěna nejnižší vtisková tvrdost (113,413 MPa). Procentuální nárůst od nejnižší hodnoty vtiskové tvrdosti činí 37,95%.

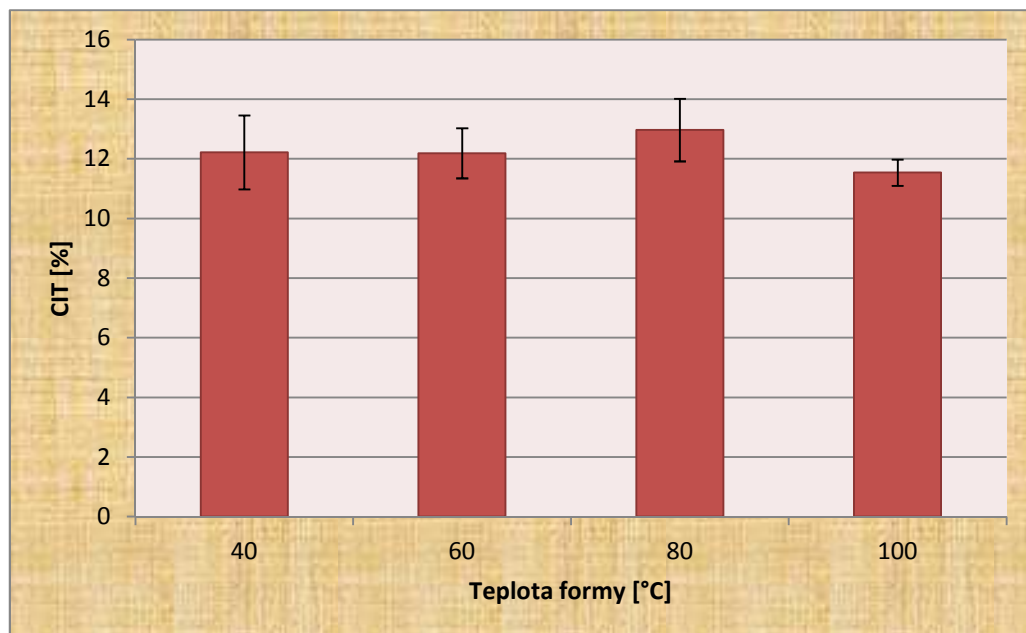
- **Vtiskový modul**



Obr. 22 Vtiskový modul PP+10% Grafitu

Z výsledku měření vtiskového modulu je podle Obr. 22 zřejmé, že největší hodnotu modulu získal vzorek vstřikovaný při teplotě formy 80°C (3,337 GPa). Zatím co nejnižší hodnotu modulu získal při 40°C (2,148GPa). Procentuální rozdíl mezi nejmenší a největší hodnotou je 55,35%.

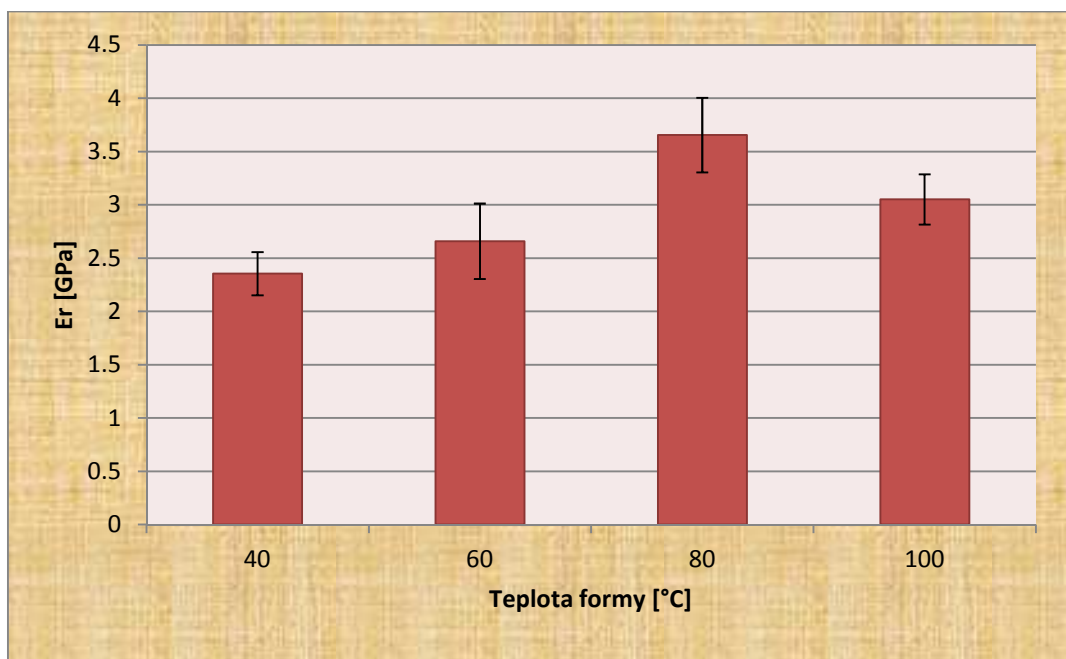
- **Creep**



Obr. 23 Creep PP+10% Grafitu

Z měření mikrotvrdomosti vyplívá, že u PP+10% Grafitu bylo naměřeno nejvyšší hodnoty creepu u vzorku vstříkovaného při teplotě vstříkovací formy 80°C. Nejnižších hodnot bylo naměřeno při 100°C, kdy procentuální rozdíl byl 12,43%. Jak můžeme vidět na Obr. 23.

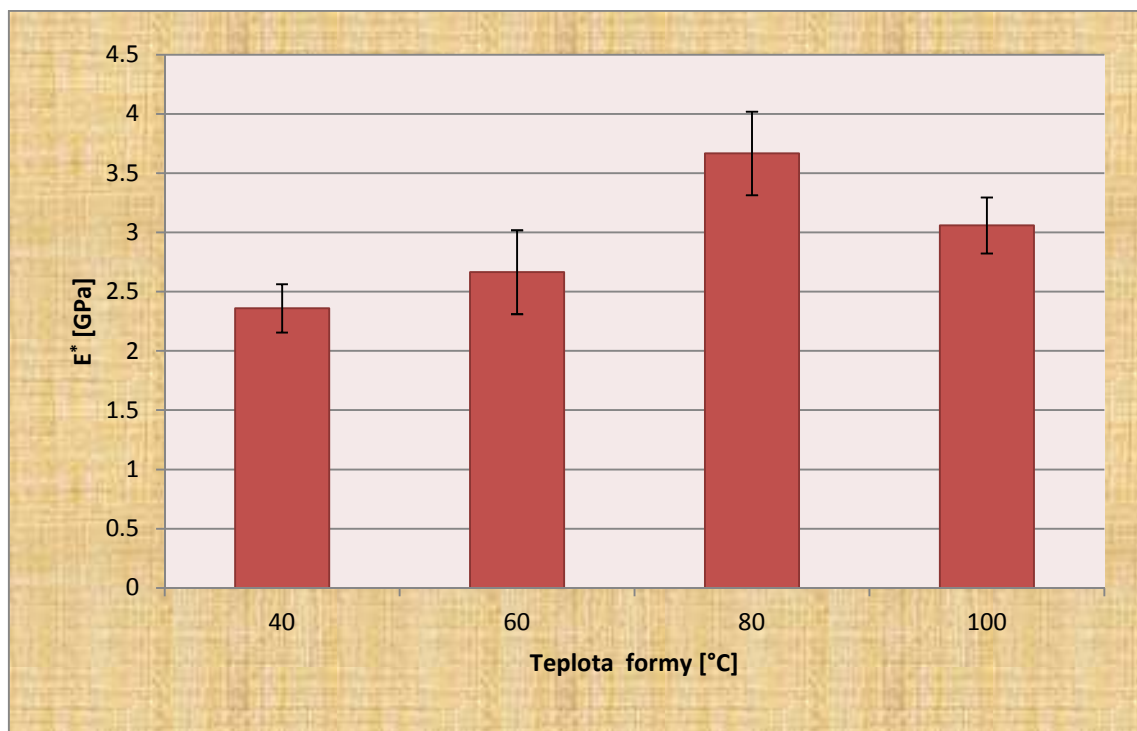
- **Redukovaný modul**



Obr. 24 Modul redukovaný PP+10% Grafitu

Obr. 24 ukazuje hodnoty redukovaného modulu pro vzorek PP+10% Grafitu. Maximálních hodnot bylo naměřeno u vzorku vstříkovaného při teplotě formy 80°C tedy 3,655 GPa a nejnižších hodnot bylo naměřeno při teplotě formy 40°C tedy 2,355GPa. Nárůst hodnot od minimální hodnoty pro tento vzorek je přibližně 55%.

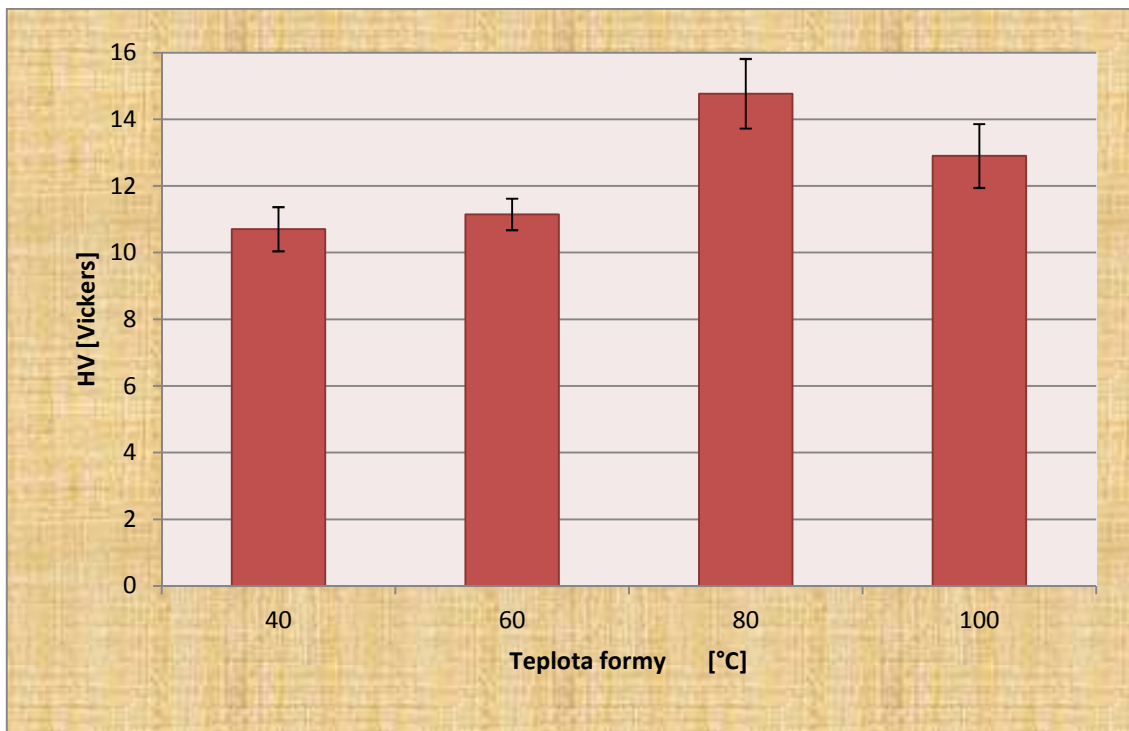
- Komplexní modul



Obr. 25 Komplexní modul PP+10% Grafítu

Při určování hodnot komplexního modulu vycházíme z Obr. 25, odkud vyplývá, že maximální hodnoty získal při 80°C tedy 3,667 GPa. Minimální hodnotu získal vzorek při 40°C tedy 2,360 GPa. Pokles od maximální hodnoty na minimální je přibližně 55%.

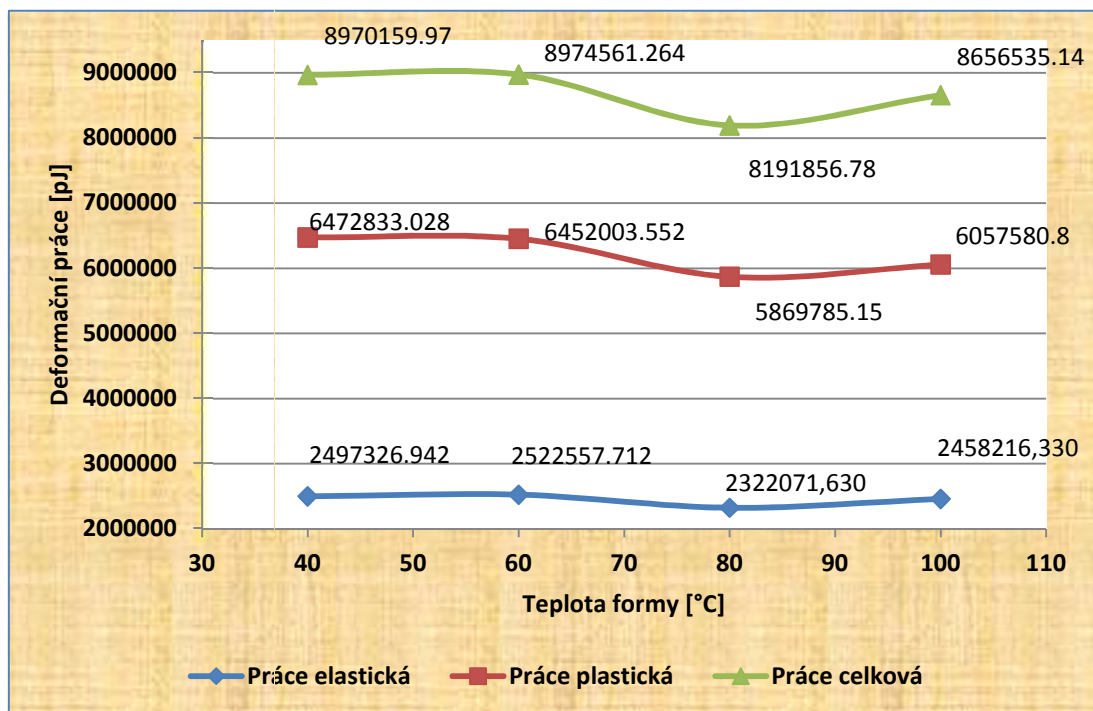
- Tvrđost



Obr. 26 Tvrđost PP+10% Grafitu

Při měření tvrdosti u vzorku PP+10% grafitu pomocí Vickersovy metody vykazoval nejmenší tvrdost vzorek, který byl vstřikován při 40°C (10,704 HV). Největší tvrdost získal vzorek, který byl vstřikován o pracovní teplotě formy 80°C (14,768 HV). Nárůst tvrdosti u je 37,97% jak můžeme demonstrovat na Obr. 26.

- Deformační práce



Obr. 27 Deformační práce PP+10% Grafitu

Další významné materiálové parametry získané v průběhu mikrotvrdosti jsou elastické a plastické deformační práce. Elastická deformační práce určuje reakci materiálu na aplikované zatížení s vratnou deformací. Plastická část deformační práce je definována, jako tuhost a odolnost testovaného materiálu proti vzniku plastické deformace. Vzniklá celková práce je kombinací plastické a elastické práce. U vzorku PP+10% Grafitu byla nejmenší hodnota elastické práce (2322071,63 pJ) při 80°C naopak nejvyšší hodnota práce byla při teplotě formy 60°C (2522557,712 pJ). Nárůst elastické práce činí 8,15%. Naopak u plastické deformační práce byla nejmenší hodnota při 80°C (5869785,15pJ) naopak nejvyšší hodnotu práce byla při 40°C (6472833,028 pJ). Nárůst plastické deformační práce činí 11,37%. Celková práce nabyla minimálních hodnot při 80°C (8191856,78 pJ) a maximálních při 60°C (8974561,264 pJ). Naměřené výsledky elastické, plastické a celkové deformační práce jsou zobrazeny v Obr. 27.

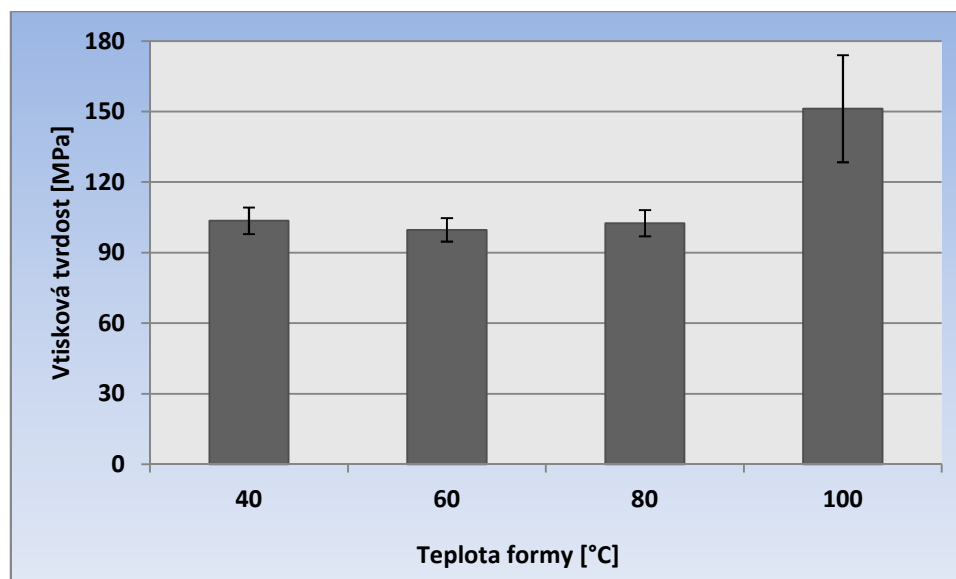
8.2.2 Vzorek PP+40% Mastku

Vzorek byl vstřikován do formy o pracovní teplotě 40; 60; 80 a 100°C. Posléze jsme na vzorek působily maximálním zatížením 1N s výdrží 90s. Jeho naměřené zprůměrované hodnoty jsou zobrazeny v tabulce Tab. 4.

Tab. 4 Naměřené hodnoty PP+40% Mastku

	40°C	60°C	80°C	100°C
HIT (Mpa)	103,557	99,688	102,553	151,195
EIT (Gpa)	2,399	2,308	2,308	2,769
Er (Gpa)	2,63	2,530	2,574	3,035
E* (Gpa)	2,636	2,536	2,58	3,043
Creep (%)	11,796	11,683	11,497	11,885
HV (Vickers)	9,774	9,409	9,679	14,271
Welast (pJ)	2412370,472	2463130,008	2467672,207	2225952,162
Wplast (pJ)	7102924,502	7116279,159	7074783,645	6140084,339
Wtotal (pJ)	9515294,974	9579409,167	9542455,855	8366036,500

- **Vtisková tvrdost**

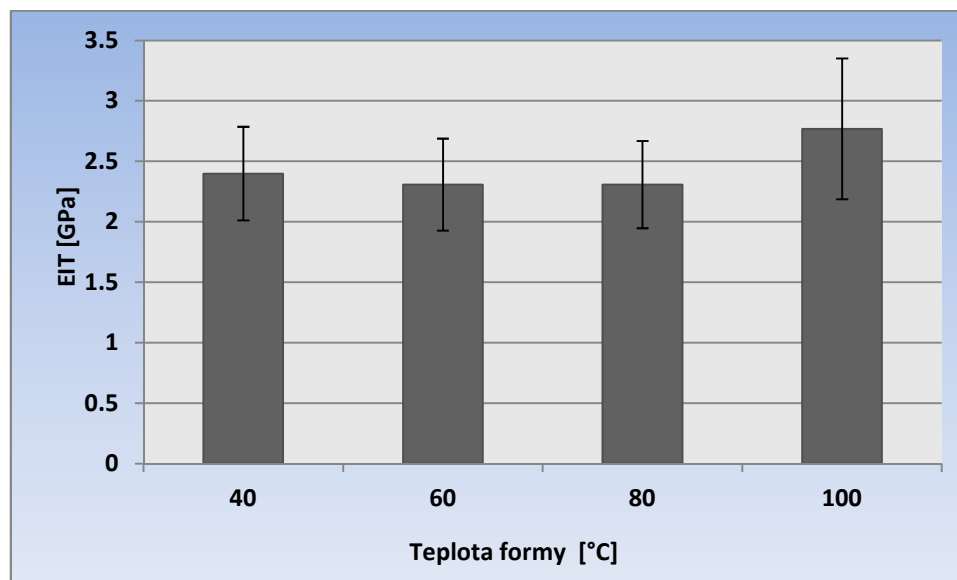


Obr. 28 Vtisková tvrdost PP+40% Mastku

Při instrumentované zkoušce mikrotvrdosti byla naměřena nevyšší hodnota Vtiskové tvrdosti u vzorků vstřikovaných při teplotě vstřikovací formy 100°C (151,195 MPa) jak můžeme vidět na Obr. 28. U vzorku, který byl vstřikován při pracovní teplotě formy 60°C,

byla zjištěna nejnižší vtisková tvrdost (99,688 MPa). Procentuální nárůst od nejnižší hodnoty vtiskové tvrdosti činí 51,67%.

- **Vtiskový modul**

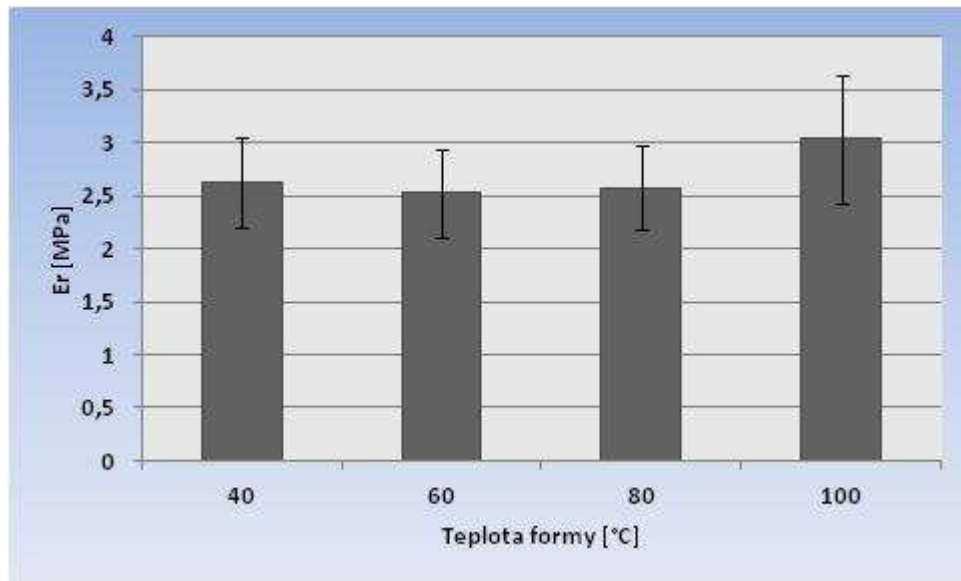


Obr. 29 Vtiskový modul PP+40% Mastku

Z výsledku měření vtiskového modulu podle Obr. 29 je zřejmé, že nejvyšší hodnota modulu byla naměřena u vzorek vstříkovaného při teplotě formy 100°C (2,679 GPa). Zatím co nejnižší hodnotu modulu byla naměřena při 60 a 80°C (2,308GPa). Procentuální rozdíl mezi nejmenší a největší hodnotou je 19,97%

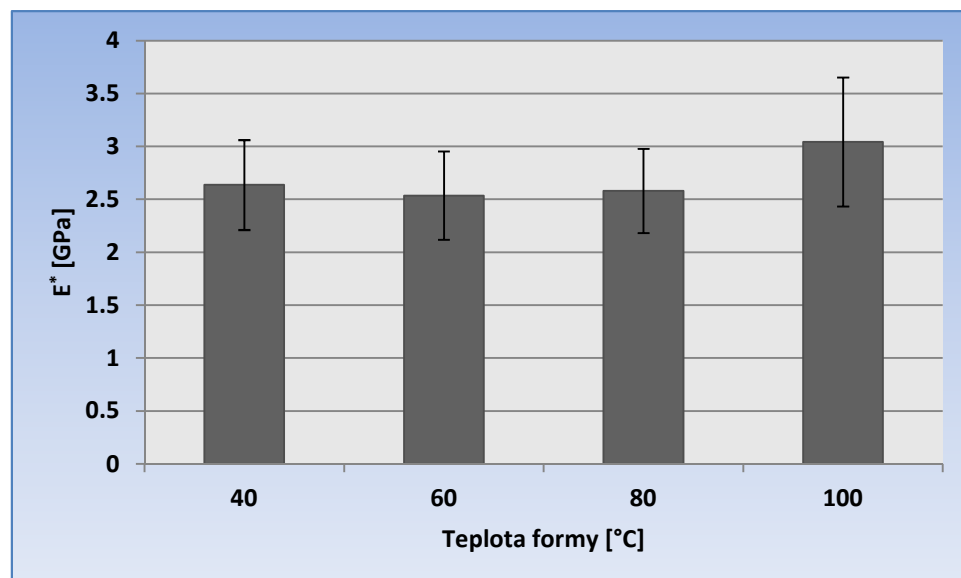
- **Redukovaný modul**

Obr. 30 ukazuje hodnoty redukovaného modulu pro materiál PP+40% Mastku. Maximálních hodnot nabyl vzorek vstříkovaný při teplotě formy 100°C tedy 3,035 GPa a nejnižších hodnot získal při teplotě formy 60°C tedy 2,530GPa. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou Redukovaného modulu pro materiál PP+40% Mastku je přibližně 19,96%.



Obr. 30 Redukovaný modul PP+40% Mastku

- **Komplexní modul**

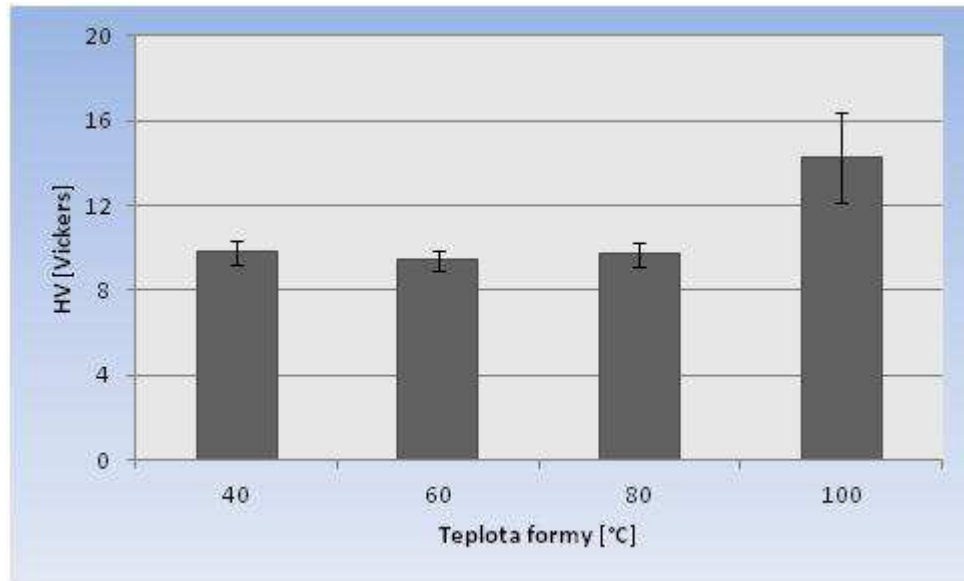


Obr. 31 Komplexní modul PP+40% Mastku

Při určování hodnot komplexního modulu vycházíme z Obr. 31, odkud vyplývá, že maximální hodnota byla určena při teplotě formy 100°C tedy 3,043 GPa. Minimální hodnota byla naměřena u vzorku vstřikovaného při teplotě formy 60°C tedy 2,536 GPa. Pokles od maximální hodnoty na minimální je přibližně 20%.

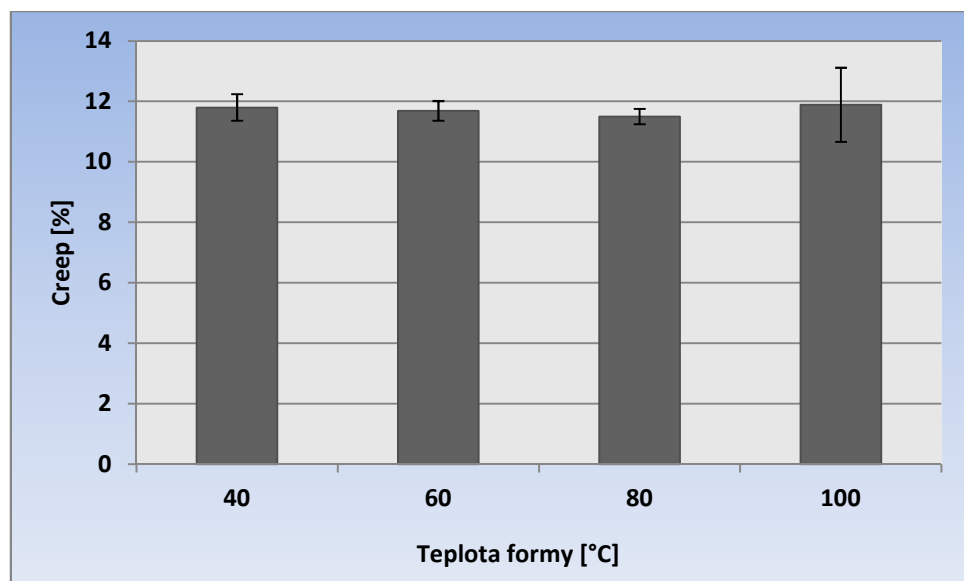
- Tvrdość podle Vickerse

Při měření tvrdosti u vzorku PP+40% mastku pomocí Vickersovy metody vykazoval nejmenší tvrdost vzorek, který byl vstřikován při 60°C (9,409 HV). Největší tvrdost získal vzorek, který byl vstřikován o pracovní teplotě formy 100°C (14,271 HV). Nárůst tvrdosti u je 51,67% jak můžeme demonstrovat na Obr. 32.



Obr. 32 Tvrdość dle Vickerse PP+40% Mastku

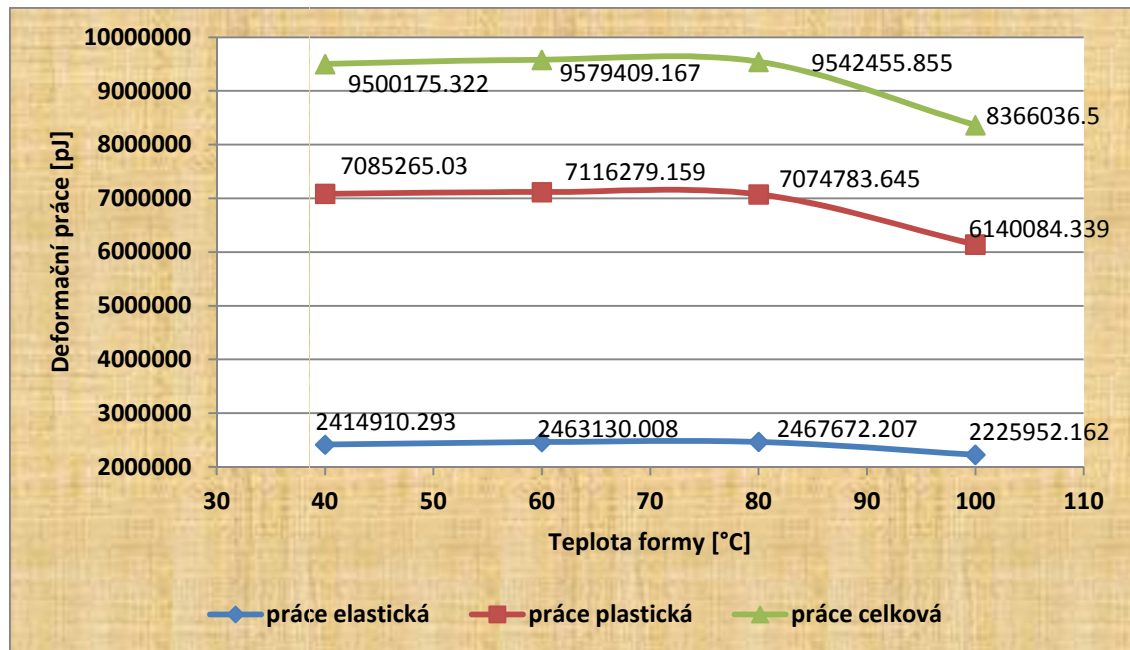
- Creep



Obr. 33 Creep PP+40% Mastku

Z měření mikrotvrdomosti vyplývá, že u PP+40% Mastku bylo naměřeno nejvyšší hodnoty creepu u vzorku vstříkovaného při teplotě vstříkovací formy 100°C. Nejnižších hodnot bylo naměřeno při 80°C. Jak můžeme vidět na Obr. 23 (strana 51.).

- **Deformační práce**

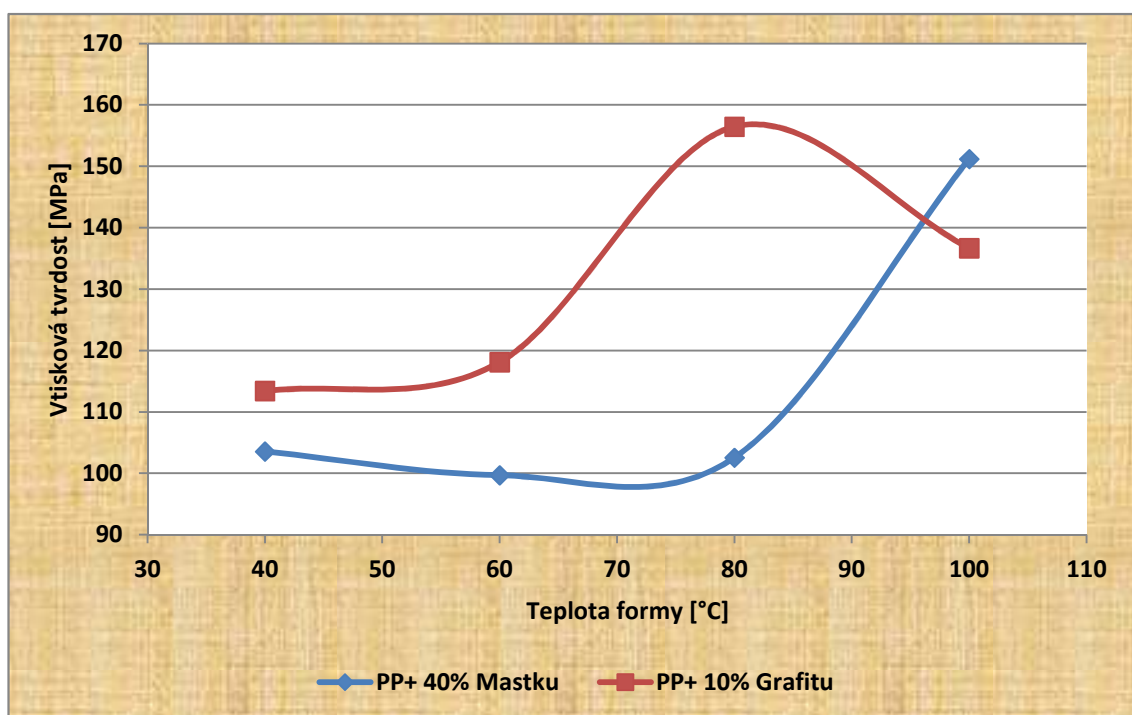


Obr. 34 Deformační práce PP+40% Mastku

Další významné materiálové parametry získané v průběhu mikrotvrdomosti jsou elastické a plastické deformační práce. Elastická deformační práce určuje reakci materiálu na aplikované zatížení s vratnou deformací. Plastická část deformační práce je definována, jako tuhost a odolnost testovaného materiálu proti vzniku plastické deformace. Vzniklá celková práce je kombinací plastické a elastické práce. U vzorku PP+40% mastku byla nejmenší hodnota elastické deformační práce při 100°C naopak nejvyšší hodnotu práce byla při 60°C. Nejmenší hodnota plastické deformační práce je při 100°C, naopak nejvyšší hodnotu práce byla při 40°C. Celková deformační práce nabyla minimálních hodnot při 100°C a maximálních při 60°C. Naměřené výsledky elastické, plastické a celkové deformační práce jsou zobrazeny v Obr. 34.

8.3 Diskuse výsledků

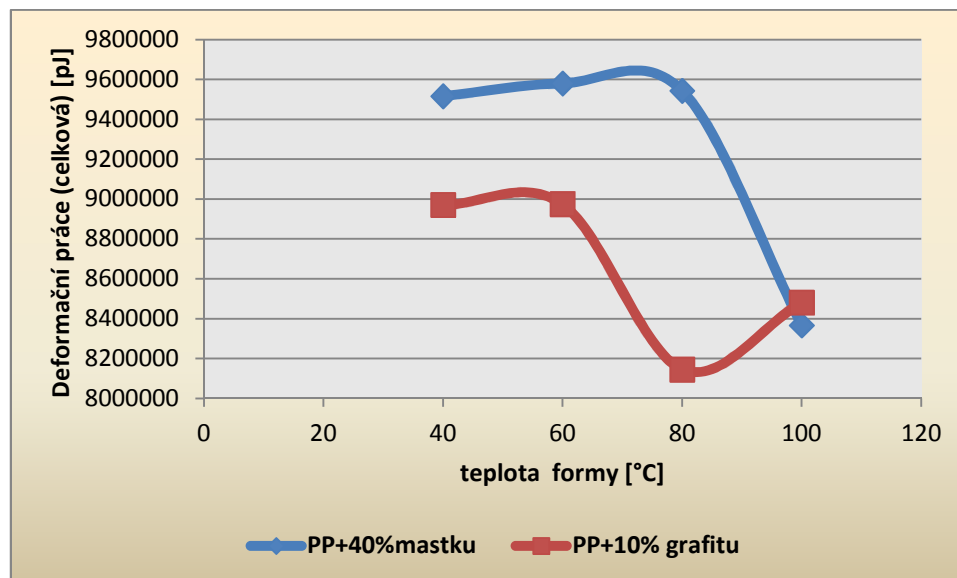
Během experimentu jsme porovnávali dva vzorky z polypropylenu s různými příměsi. V prvním případě jde o 10% příměsí grafitu a ve druhém 40% příměs mastku. Tyto vzorky byly vstřikovány do formy o pracovních teplotách 40, 60, 80 a 100°C. V prvním případě, kdy se jedná o vzorek s příměsí grafitu, byla ideální pracovní teplota formy při 80°C. Při této teplotě měl vzorek maximální hodnoty u veškerých námi měřených veličin. Pro druhý vzorek s příměsí mastku byla ideální teplota při 100°C.



Obr. 35 Porovnání vtiskové tvrdosti vzorků

Z obr. 35 se domnívám, že při nízké teplotě formy může docházet ke špatné homogenizaci materiálů. Naopak při vysoké teplotě formy může docházet k degradaci materiálu, která je způsobena vysokou teplotou formy. Při odlišných teplotách dochází k zhoršení mechanických vlastností.

Tyto vady mají také vliv na deformační práce. Kdy při ideálních teplotách dochází k obrovskému poklesu práce, jak můžeme dokázat v Obr. 36 (stránka 54.). Kde má ve většině případů větší deformační práci vzorek polypropylenu s příměsí mastku.



Obr. 36 Porovnání deformačních prací

ZÁVĚR

Bakalářské práce v první části řeší metody tvrdosti a v druhé části se zabývá zkoumáním vlivu pracovní teploty formy na výsledné mechanické vlastnosti především tvrdosti a zpracování naměřených hodnot, které jsou statisticky vyhodnocené.

Pro daný experiment byly použity dva typy vzorku z polypropylenu s různými příměsí (mastku a grafítu). Vzorky byly vstříkovány do formy o pracovní teplotě 40, 60, 80 a 100°C.

Z naměřených hodnot, které jsme získali pomocí metody DSI na přístroji MICRO-COMBI TESTER, vyplývá, že vzorek polypropylenu s příměsí 10% grafítu je nejvýhodnější teplota zpracování 80°C. Při této teplotě měl vzorek maximální hodnoty tvrdosti a minimální deformační práci. Při odlišných teplotách docházelo ke ztrátě tvrdosti a k nárůstu deformační práce.

U vzorku polypropylenu s příměsí 40% mastku došlo k největšímu nárůstu tvrdosti při teplotě formy 100°C. Při této teplotě měl vzorek rovněž nejnižší deformační práci.

Během experimentu jsme zjišťovali rovněž tvrdost dle Vickerse, kdy vzorky polypropylenu s příměsí mastku a grafítu měli téměř stejnou tvrdost při ideálních pracovních teplotách. U vzorku polypropylenu s příměsí mastku byla naměřena tvrdost 14,271 HV a pro příměs grafítu 14,768 HV.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 204 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [2] PLUHAŘ, Jaroslav. KOLEKTIV. *Nauka o materiálech*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 549 s.
- [3] PÍŠEK, František. *Nauka o materiálu III: 2. svazek*. Praha: Československá akademie věd, 1962, 658 s.
- [4] DOLEŽAL, Pavel; PACAL, Bohumil. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálu-lů*. Brno : VUT, 2006. 41 s.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav, PAŇÁK Rudolf a MODRÁČEK Oldřich. KOLOUCH. *Strojírenská technologie: Nauka o materiálu*.
- [6] DUŠEK, Jiří. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost - čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. 171 s. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [7] GYMNÁZIUM, STŘEDNÍ ODBORNÁ ŠKOLA A VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA LEDEČ NAD SÁZAVOU. *Makromolekulární látky (polymery)* [online]. Gymnázium, střední odborná škola a vyšší odborná škola Ledec nad Sázavou, 2012 [15.1.2012] Dostupné z: <http://www.gvi.cz/files/chemie/mml.pdf>
- [8] STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA STROJNICKÁ OLOMOUC. *Zkoušky tvrdosti* [online]. Střední průmyslová škola strojnická Olomouc, 2012 [15.1.2012]. Dostupné z: http://www.spssol.cz/~vyuka/TRIDY/4.C/SPS/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [9] CONVERTER. *Zkouška tvrdosti dle Brinella*. *Converter.cz* [online]. 2012 [20.1.2012]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-brinell.htm>
- [10] VYSOKÁ ŠKOLA V LIBERCI. *Termoplasty* [online]. Vysoká škola v Liberci, 2006 [18.05.2012]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf.
- [11] KMM.ZCU. *Zkoušky a metody analýz žárových nástřiků*. *Kmm.zcu.cz* [online]. 2012 [20.1.2012]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/11.html#4>.
- [12] IME.FME.VUTBR. *Mikrotvrdost*. *Ime.fme.vutbr.cz* [online]. 2012 [20.1.2012]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Mikrotvrdost/uvod/uvod/uvod_str.htm

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E^*	Komplexní modul
E_i	Elastický modul pružnosti indentoru
E_{IT}	Vtiskový modul
E_r	Redukovaný model
C_{IT}	Creep
HV	Tvrдость dle Vickerse
HK	Tvrдость dle Knoop
H_{ch}	Tvrдость dle Berkoviče
H_{IT}	Vtisková tvrдость
W_{elst}	Elastická deformační práce
W_{plast}	Plastická deformační práce
W_{total}	Celková deformační práce
F_{max}	Maximální síla
A_p	Průmět kontaktní plochy (teoretická nebo kalibrovaná)
S_t	Vtisková tuhost
H_c	Hloubka vtisku
S	Plocha
l	Délka úhlopříčky
l	Výška změřená na trojúhelníkovém vtisku
k_1	Korekční faktor daný cejchováním rozměrů použitého tělíska
k_2	Konstanta pro přepočet délky úhlopříčky na plochu vtisku
u	Délka úhlopříčky
PP	Polypropylen
ν_i	Poissonova konstanta indentoru

ν_s Poissonova konstanta vzorku

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Tvary molekul polymerů</i>	14
<i>Obr. 2 Chemický vzorec polypropylenu</i>	16
<i>Obr. 3 Martensův přístroj k vrypové zkoušce tvrdosti</i>	19
<i>Obr. 4 Zkouška dle Brinella</i>	20
<i>Obr. 5 Zkouška podle Rockwella</i>	21
<i>Obr. 6 Deformace vtisku</i>	24
<i>Obr. 7 Trhlina v oblasti vtisku Vickersova jehlanu.....</i>	24
<i>Obr. 8 Zkouška dle Vickerse</i>	25
<i>Obr. 9 Vzhled vtisku dle Knoopu</i>	26
<i>Obr. 10 Tvar diamantového jehlanu podle Knoopu.....</i>	27
<i>Obr. 11 Schéma tříbokého jehlanu.....</i>	28
<i>Obr. 12 Baumannovo Kladivo.....</i>	29
<i>Obr. 13 Kladívko Poldi</i>	30
<i>Obr. 14 Skleroskop.....</i>	31
<i>Obr. 15 Schéma duroskopu</i>	32
<i>Obr. 16 Indentační křivky</i>	35
<i>Obr. 17 Tvrdoměr MICRO-COMBI TESTER.....</i>	36
<i>Obr. 18 Tvrdoměr MICRO-COMBI TESTER.....</i>	36
<i>Obr. 19 Chemický vzorec polypropylenu</i>	38
<i>Obr. 20 Deformační práce</i>	41
<i>Obr. 21 Vtisková tvrdost PP+10% Grafitu.....</i>	42
<i>Obr. 22 Vtiskový modul PP+10% Grafitu</i>	43
<i>Obr. 23 Creep PP+10% Grafitu.....</i>	43
<i>Obr. 24 Modul redukovaný PP+10% Grafitu.....</i>	44
<i>Obr. 25 Komplexní modul PP+10% Grafitu</i>	45
<i>Obr. 26 Tvrdost PP+10% Grafitu</i>	46
<i>Obr. 27 Deformační práce PP+10% Grafitu</i>	47
<i>Obr. 28 Vtisková tvrdost PP+40% Mastku.....</i>	48
<i>Obr. 29 Vtiskový modul PP+40% Mastku</i>	49
<i>Obr. 30 Redukovaný modul PP+40% Mastku</i>	50
<i>Obr. 31 Komplexní modul PP+40% Mastku</i>	50
<i>Obr. 32 Tvrdost dle Vickerse PP+40% Mastku.....</i>	51

<i>Obr. 33 Creep PP+40% Mastku</i>	51
<i>Obr. 34 Deformační práce PP+40% Mastku</i>	52
<i>Obr. 35 Porovnání vtiskové tvrdosti vzorků</i>	53
<i>Obr. 36 Porovnání deformačních prací</i>	54

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Sestavení nerostů podle Mohseovy</i>	19
<i>Tab. 2 Typy zkoušek a rozsahy použití</i>	25
<i>Tab. 3 Naměřené hodnoty PP+10% Grafitu.....</i>	42
<i>Tab. 4 Naměřené hodnoty PP+40% Mastku.....</i>	48