

# Měření nanotvrdosti PA 12

Daniel Kohl

---

Bakalářská práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Daniel Kohl**  
Osobní číslo: **T11247**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření nanotvrdosti PA 12**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních těles pro experiment
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení BP**

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. David Mañas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**10. února 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**23. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*





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

Příjmení a jméno: ..... KOHL DANIEL ..... Obor: ..... T 2 .....

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně ..... 13.5.2014 .....

.....  .....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

se projekt skládá. Neodvzdání této součásti může být důvodem k neobhajobě práce.  
produkt považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. souhrny ze kterých  
přílohu, pokud je výstupem diplomového/bakalářské práce jakýkoliv softwarový  
diplomového/bakalářské práce využití ke komerčním účelům;  
studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčním využitím), nezávisle  
softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke  
přílohu na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomového/bakalářské práce využito  
ve Zlíně na vytvoření díla vytvořeny (až do jejich skutečné výše);  
projektem přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati  
Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne  
přílohu nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem  
přílohu na vědomí, že podle § 60 odst. 3 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou  
uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;  
přílohu na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na

Ve Zlíně .....  
.....

Právní úprava autorského práva a práva souvisejících s ním v České republice je upravena v zákoně 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. Tento zákon byl schválen Parlamentem České republiky a vstoupil v platnost dne 1. 1. 2001.

## **ABSTRAKT**

Cílem bakalářské práce bylo měření nanotvrdosti Polyamidu 12. Testovaná zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 470C. Zkušební tělesa byla ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, a 99 kGy. Měření nanotvrdosti proběhlo na nanotvrdoměru (NHT2) – Opx/Cpx od firmy CSM Instruments, při zatížení 10mN. Výsledky měření ukázaly zhoršení mikromechanických vlastností testované povrchové vrstvy modifikovaného polyamidu 12.

Klíčová slova: nanotvrdost, beta záření, polyamid 12

## **ABSTRACT**

The aim of the study was to measure nanohardness of Polyamide 12. The test specimens were made by injection technology on injection machine ARBURG ALLROUNDER 470C. Specimens were irradiated at doses of beta radiation 0, 33, 66, a 99 kGy. Nanohardness measurements were performed on microhardness (NHT2) – Opx/Cpx CSM Instruments, with load force 10 mN. The measurement results showed worsening of micromechanical properties of the tested surface layer of modified polyamide 12.

Keywords: nanohardness, beta radiation, polyamide 12

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. za odborné vedení a rady jak při teoretické, tak i při experimentální části. Dále bych chtěl poděkovat všem ostatním, kteří mi s touto prací pomohli.

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

Ve Zlíně.....

.....

Daniel Kohl

# OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 MĚŘENÍ TVRDOSTI POLYMERŮ .....	12
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK TVRDOSTI .....	12
1.2 STATICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	14
1.2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella .....	14
1.2.1.1 Popis zkoušky. ....	14
1.2.1.2 Ideální podmínky při zkoušení .....	15
1.2.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	16
1.2.2.1 Princip metody .....	17
1.2.2.1 Zkušební tělesa .....	19
1.2.2.2 Podmínky při zkoušení .....	19
1.2.2.3 Zápis naměřených hodnot podle Rockwella.....	19
1.2.2.4 Zkušební zařízení pro metodu Rockwell .....	20
1.2.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	22
1.2.3.1 Princip metody .....	22
1.2.3.2 Zkušební těleso .....	23
1.2.3.3 Provedení zkoušky.....	24
1.2.3.4 Zápis naměřených hodnot podle Vickerse.....	24
1.2.3.5 Zkušební zařízení pro metodu Vickers .....	25
1.2.3.6 Vyhodnocení zkoušky.....	26
1.2.4 Zkouška tvrdosti Shore .....	27
1.2.4.1 Podstata metody .....	27
1.2.4.2 Zkušební zařízení.....	27
1.2.4.3 Zkušební tělesa .....	28
1.2.4.4 Provedení zkoušky.....	28
1.2.4.5 Zápis naměřených hodnot.....	29
1.2.5 Metoda IRHD.....	30
1.2.5.1 Princip metody .....	30
1.2.5.2 Zkušební zařízení.....	32
1.2.5.3 Zkušební tělesa .....	32
1.2.5.4 Provádění zkoušky.....	33
1.2.5.5 Zápis hodnoty tvrdosti .....	33
1.3 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	33
1.3.1 Durosokop .....	33
1.3.1.1 Zkušební zařízení.....	33
1.3.2 Tvrdoměr Poldi .....	34
1.3.2.1 Použití a popis.....	34
1.3.3 Shoreho skleroskop .....	35
1.3.3.1 Vyhodnocení.....	35
1.3.3.2 Zkušební zařízení.....	35
1.3.4 Baumannovo kladívko .....	36
1.3.4.1 Určení tvrdosti .....	36
1.4 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI .....	37
1.4.1 Princip metody .....	37
1.4.2 Metody zpracování indentačních dat .....	39



1.4.3	Tvrđost .....	39
1.4.4	Modul pružnosti .....	40
1.4.5	Vtiskové tečení .....	41
1.4.6	Vtisková relaxace .....	41
1.4.7	Deformační práce .....	42
<b>2</b>	<b>POLYMERY .....</b>	<b>43</b>
2.1	ROZDĚLENÍ POLYMERŮ .....	43
2.1.1	Termoplasty .....	43
2.1.2	Reaktoplast .....	44
2.1.3	Elastomery .....	44
2.2	ROZDĚLENÍ POLYMERŮ PODLE TVARU MAKROMOLEKULÁRNÍCH ŘETĚZCŮ .....	44
2.2.1	Lineární polymer (a) .....	44
2.2.2	Rozvětvený polymer (b) .....	44
2.2.3	Zesíťovaný polymer (c) .....	44
2.2.4	Prostorově zesíťovaný polymer (d) .....	45
2.3	DĚLENÍ POLYMERŮ Z HLEDISKA APLIKACÍ .....	45
2.3.1	Standartní použití .....	45
2.3.2	Konstrukční plasty .....	45
2.3.3	High-tech plasty .....	45
<b>3</b>	<b>POLYAMID .....</b>	<b>47</b>
3.1	ROZDĚLENÍ POLYAMIDŮ .....	47
3.2	VLASTNOSTI POLYAMIDU .....	47
3.3	VÝROBA POLYAMIDU .....	48
3.4	ATMOSFÉRICKÉ STÁRNUTÍ POLYAMIDU .....	48
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....</b>	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>PŘIPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK .....</b>	<b>51</b>
5.1	VSTŘIKOVACÍ STROJ .....	51
5.1.1	Vstřikovací podmínky .....	51
<b>6</b>	<b>MĚŘENÍ NANOTVRDOSTI .....</b>	<b>52</b>
6.1.1	Popis přístroje .....	52
<b>7</b>	<b>ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>58</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>68</b>

## ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá měřením nanotvrlosti Polyamidu 12. Tvrlost je důležitou mechanickou vlastností pro konečnou aplikaci. Hlavní výhody zkoušek tvrdosti jsou především jednoduchost, nízká cena, rychlost a opakovatelnost.

Tvrlost lze definovat jako odolnost materiálu proti místní deformaci vyvozené zatěžovacím tělesem neboli vnikajícím tělesem. Podstatou zkoušky je vtlačování přesně definovaných tvarů za stanovených podmínek do povrchu zkušební tělesa. Principem měření je určení vztahu mezi silou, která vtlačuje tvrdý hrot, a plochou otisku, která vtlačováním hrotu vznikne.

Hlavním cílem bakalářské práce je měření nanotvrlosti povrchové vrstvy polyamidu 12, modifikovaného beta zářením. Zkušební tělesa byla následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, a 99 kGy. Teoretická část byla zaměřena především na vybrané metody měření tvrdosti. V praktické části jsem analyzoval a graficky znázornil naměřená data.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 MĚŘENÍ TVRDOSTI POLYMERŮ

Tvrlost lze definovat jako odpor materiálu proti vniknutí cizího tvrdšího tělesa. Polymery se při zatížení zkušebním tělesem deformují v celém svém objemu, ale mohou být také pružné. Hodnoty tvrdosti se mohou uvádět bez jednotek, nebo v MPa. Tvrlost se značí písmenem H (anglicky tvrdost = hardness). [1]

### 1.1 Základní rozdělení zkoušek tvrdosti

Podle použitého principu měření tvrdosti se dělí na:

#### **Odrázové metody**

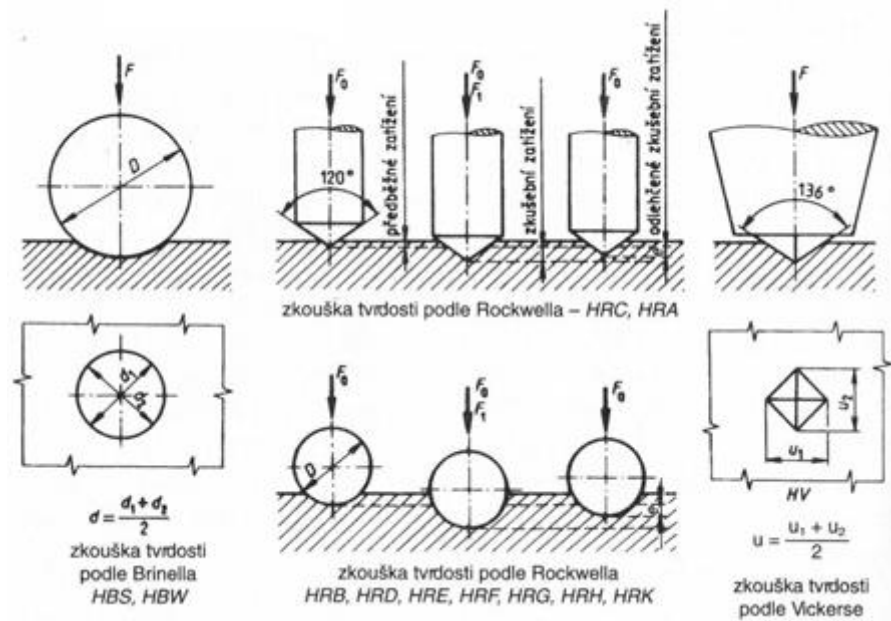
tvrdost se měří podle velikosti odrazu závaží s kulovitě vybroušeným diamantovým hrotem. Ten dopadá z určité výšky na zkoušený předmět. Hodnota tvrdosti HSh (podle Shoreho) je výška odskoku. Používá se u velmi tvrdých materiálů.

#### **Vrypové metody**

Při malém zatížení se tvrdým hrotem vytvoří na zroušeném povrchu materiálu vryp. Míra tvrdosti je síla, potřebná k vytvoření vrypu širokého 0,01 mm. V dnešní době se používá méně. Hlavně se používá pro tvrdé a křehké materiály jako je sklo a porcelán. V praxi se používá zkouška podle Martense.

#### **Vnikací metody**

Je to nejrozšířenější metoda založena na vtlačování kuličky popř. kuželu, jehlanu nebo jiného tělesa z kalené oceli, diamantu nebo tvrdého kovu do zkušebního materiálu. Měří se velikost vtisku (plocha, hloubka nebo úhlopříčka). Nejpoužívanější a nejznámější jsou zkoušky podle Brinella, Rockwella a Vickerse. Na tvrdé a kalené materiály se používá zkouška podle Rockwella a tvrdost neželezných kovů se zkouší podle Brinella. Vickersova metoda odstraňuje nevýhody obou předchozích proto je nejpoužívanější. [2]



Obr. 1 Druhy zkoušek tvrdosti

Dále lze zkoušky dělit podle odezvy materiálu na působící zatížení a podle aplikovaného zatížení na zkušební těleso na:

### Statické

Jsou to nejrozšířenější zkoušky tvrdosti (Brinell, Rockwell, Vickers). Zatěžující síla působí kolmo na zkušební povrch. Měření je velmi přesné. Tyto zkoušky lze podle ČSN ISO 14577-1 rozdělit podle velikosti zatěžující síly a hloubky vtisku na:

- zkoušky makrotvrdosti -  $2\text{N} < F < 30000\text{N}$
  - zkoušky mikrotvrdosti -  $2\text{N} > F$ ,  $h > 200\text{nm}$
  - zkoušky nanotvrdosti -  $0,1\text{N} > F$ ,  $h < 200\text{nm}$
- Kde  $F$  je maximální síla a  $h$  maximální hloubka vtisku.

### Dynamické

Používají se ve výrobě jako kontrolní. Síla působí nárazově ve směru kolmo na zkoušený povrch. Patří zde především zkoušky Poldiho kladívkem, Shoreho skleroskopem a duroskopem. [2]

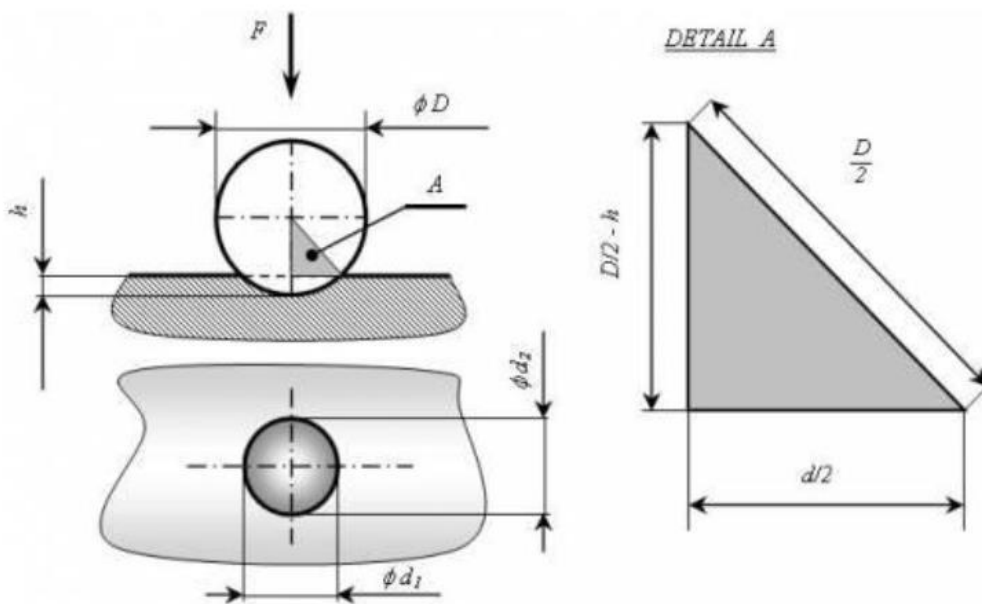
## 1.2 Statické zkoušky tvrdosti

### 1.2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Zkoušku vynalezl v roce 1900 Švédský metalurg Johan August Brinell. Je to zkouška vtisková, využívá plastické deformace materiálu za působení statické síly.

#### 1.2.1.1 Popis zkoušky

Měření probíhá vtláčováním leštěné kuličky ze slinutých karbidů, označována HBW, o průměru 10; 5; 2.5 ; a 1 mm do zkušebního tělesa rovnoměrně stupňovanou silou  $F$  ( $F=300 D^2$ ;  $100 D^2$ ;  $50 D^2$ ;  $25 D^2$  N) po dobu  $t$  (10; 30; 120; 180s). Po odlehčení se změří průměr vtisku  $d$ . Dříve se používala také kulička s kalené oceli (HBS), tu již dnes norma nepřipouští. Průměr kuličky je dán tloušťkou materiálu. Zkoušený materiál by měl být alespoň 10x tlustší než průměr kuličky. Povrch materiálu musí být hladký, rovný a bez cizích tělísek a mazadel. [3]



Obr. 2 Princip měření tvrdosti Brinellovou metodou

Tvrdot podle Brinella je úměrná poměru získaného podělením zatížení  $F$  plochou povrchu vtisku  $S$ :

$$HBW = \frac{F}{S} \quad (1)$$

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

Kde F je zkušební zatížení, D průměr kuličky a d je střední průměr vtisku.

### 1.2.1.2 Ideální podmínky při zkoušení

Sílu zatěžování volíme tak, aby se hloubka vtisku h pohybovala v rozmezí 0,15 – 0,35 mm. Přesnost měření je závislá na přesnosti určení hloubky vtisku, takže je lepší používat větší kuličky a větší síly.

Dále by se zkouška měla provádět při teplotách 10°C - 35°C. Podle normy ČSN EN ISO 291 lze dosáhnout nejpřesnějších hodnot.

Vzorek by měl po dobu zkoušení ležet na pružné podložce a neměl by se pohnout. Nesmí mít ani znečištěné dosedací plochy.

### 1.2.1.3 Zápis naměřených hodnot podle Brinella

Lze zapisovat podle následujícího schématu:

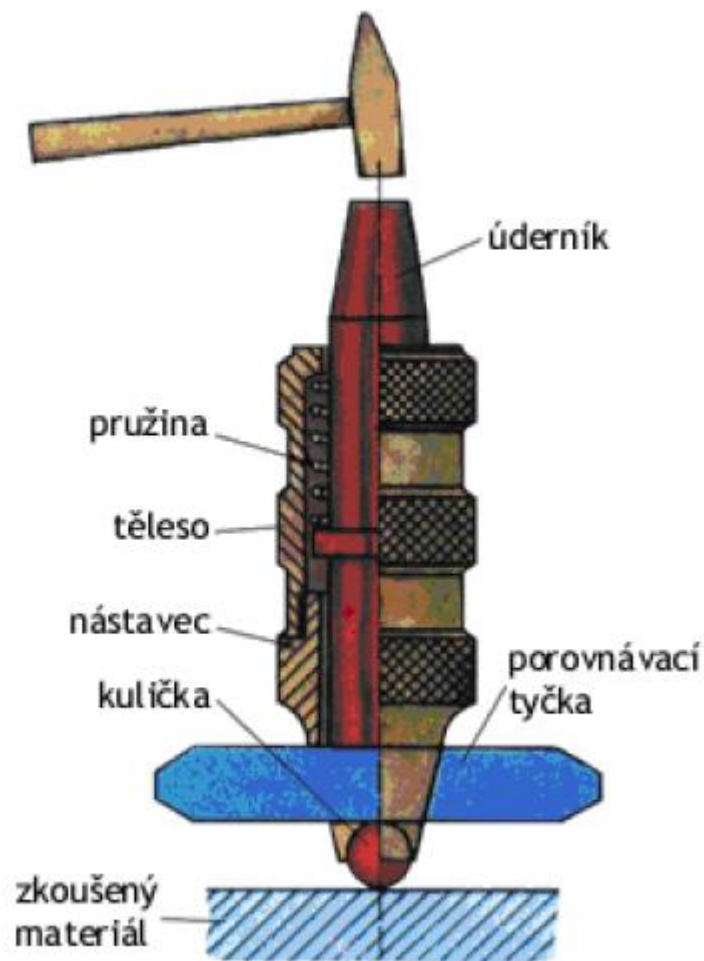
Hodnota tvrdosti	Symbol zkoušky	Rozměr vnikacího tělesa	Velikost zkušebního zatížení	Doba působení zkušebního zatížení
 — X X X	 — HB	 — XX	 — XXX	 — XX

Obr. 3 Zápis hodnot zkoušky podle Brinella

### 1.2.1.4 Brinellovy tvrdoměry

Mohou mít různou velikost i provedení. Pro malé dílny, montáže a sklady, nebo na stavbách se používají jednoduché přístroje. Ve velkých továrnách nebo laboratořích mají naopak velké stroje.

Nejpoužívanější Brinellův tvrdoměr je ruční (kapesní) tvrdoměr Poldi. Funguje na principu porovnávání známé pevnosti materiálu u porovnávací tyčky a pevnosti zkoušeného materiálu. Postup práce je takový, že napřed tvrdoměr přiložíme ke zkoušenému materiálu a na úderník udeříme kladívkem. Tím se ocelová kulička zatlačí do zkoušeného materiálu a vytvoří v něm vtisk. Průměry vtisků na zkoušeném materiálu a i na porovnávací tyči se poté změří lupou. Ke každému tvrdoměru jsou přiloženy tabulky, ve kterých vyhledáme číslo tvrdosti podle velikosti vtisku.



Obr. 4 Tvrdoměr Poldi

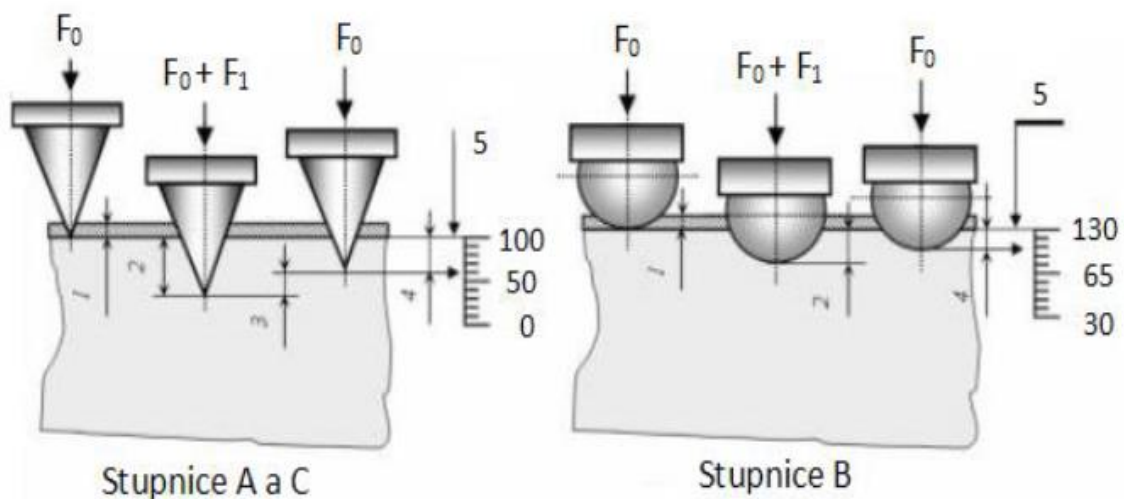
### 1.2.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Rockwellova zkouška je zkouška vtisková. Využívá plastických deformací za působení statické síly. Metoda byla vynalezena Hugh M. a Stanley P. Rockwellovými roku 1919 v USA. Hodnota tvrdosti u této zkoušky se odečítá na stupnici hloubkoměru, který je součástí tvrdoměru. Pro měření podle Rockwella se používá několik stupnic měření, a to M, L, R, E.



### 1.2.2.1 Princip metody

Metoda spočívá v postupném vtlačování indentoru do zkušebního tělesa dvěma stupni zatížení. Poté se změří trvalá hloubka vtisku  $h$ . Celková zatěžující síla  $F$  se skládá z přídavného zatížení  $F_1$  a předběžného zatížení  $F_0$ . Pod předběžným zatížením působí indentor na materiál po dobu maximálně 3 sekundy, vytvoří vtisk o hloubce 1, poté se zvýší zatížení o přídavné zatížení  $F_1$ , to prohloubí vtisk o hloubku 2, na celkové zatížení  $F$  (náběh zatížení z  $F_0$  na  $F$  se pohybuje v rozmezí 1 – 8 sekund). Poté následuje 4 – 6 sekund výdrž na tomto zatížení a následný pokles síly z hodnoty  $F$  na  $F_0$ . Tvrdost je vyhodnocována po odlehčení z hloubky vtisku 4. viz. Obr. 5.



Obr. 5 Rockwellova zkouška [5]

Zkouška dle Rockwella využívá dva tvary indentorů. Jedním je kulička z oceli nebo tvrdokovu, o průměrech 1,5875 mm nebo 3,175. Druhým tělesem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°. Kvůli existenci více indentorů a rozdílných velikostí zátěžných sil existuje několik způsobů značení tvrdosti:

- kulička - HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK, HRT
- diamantový kužel - HRA, HRC, HRD, HRN

Pro různé metody měření existuje více vztahů pro konečné vyhodnocení tvrdosti:

$$\text{HRD, HRC, HRA} = 0,100 - \frac{h}{0,002} \quad (3)$$

$$\text{HRK, HRH, HRG, HRF, HRE, HRB} = 0,130 - \frac{h}{0,002} \quad (4)$$

$$\text{HRT, HRN} = 0,100 - \frac{h}{0,001} \quad (5)$$

Kde HRx je tvrdost dle Rockwella a h hloubka vtisku po odlehčení na Fo. [3]

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Vnikací těleso	Předzátížení Fo [N]	Celkové zatížení F [N]	Oblast použití
A	HRA	Diamantový kužel	98,07 (10 kg)	588,4 (60 kg)	20 až 88 HRA
B	HRB	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")		980,7 (100 kg)	20 až 100 HRB
C	HRC	Diamantový kužel		1 471 (150 kg)	20 až 70 HRC
D	HRD	Diamantový kužel		980,7 (100 kg)	40 až 70 HRD
E	HRE	Ocelová kulička 3,175 mm (1/8")		980,7 (100 kg)	70 až 100 HRE
F	HRF	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")		588,4 (60 kg)	60 až 100 HRF
G	HRG	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")		1471 (150 kg)	30 až 94 HRG
H	HRH	Ocelová kulička 3,175 mm (1/8")		588,4 (60 kg)	80 až 100 HRH
K	HRK	Ocelová kulička 3,175 mm (1/8")		1471 (150 kg)	40 až 100 HRK
15 N	HR 15 N	Diamantový kužel		29,42 (3 kg)	147,1
30 N	HR 30 N	Diamantový kužel	294,2		42 až 86 HR 30 N
45 N	HR 45 N	Diamantový kužel	441,3		20 až 77 HR 45 N
15 T	HR 15 T	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")	147,1		67 až 93 HR 15 T
30 T	HR 30 T	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")	294,2		29 až 82 HR 30 T
45 T	HR 45 T	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")	441,3		1 až 72 HR 45 T

Obr. 6 Rockwellova stupnice [4]

### 1.2.2.1 Zkušební tělesa

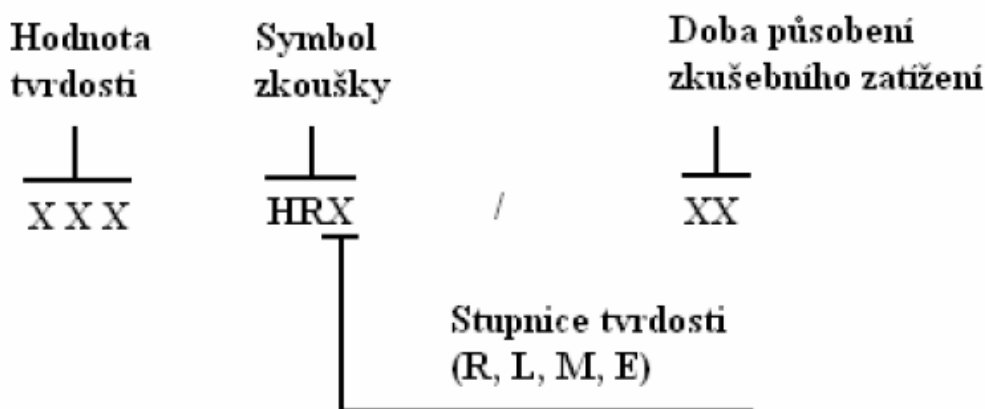
Zkušební tělesa je potřeba při provádění zkoušky kondiciovat, podmínky kondicionování udává norma ČSN EN ISO 291. Jako zkušební těleso se doporučuje používat rovinou desku o tloušťce minimálně 6 mm. Pokud lze této tloušťce nelze dosáhnout lze použít více plochých desek položených na sobě, aby byl zajištěn jejich dokonalý kontakt, nenarušený nesrovnalostí.

### 1.2.2.2 Podmínky při zkoušení

Pro dosažení nejpřesnějších výsledků je nutné se při zkoušce řídit normou ČSN EN ISO 291. Zkouška se provádí při teplotách 10°C - 35°C. Vzorek, který je umístěn na pevné podložce se nesmí během vlačování pohnout. Styčné plochy musí být bez cizích těles a nečistot. Indentor musí být vlačován do povrchu zkušební tělesa danou silou kolmo a bez rázů a chvění. Měření je nutno provádět 10 mm nebo více od okraje tělesa. Na jednom povrchu se provádí 5 měření. Naměřené hodnoty by měly být v intervalu 50 – 115, pokud se naměří vyšší hodnoty, mělo by být měření provedeno znovu s použitím jiné stupnice. [6]

### 1.2.2.3 Zápis naměřených hodnot podle Rockwella

Naměřené hodnoty Rockwellovou metodou se zapisují dle následujícího schématu:



Obr. 7 Zápis hodnot zkoušky podle Rockwella [7]

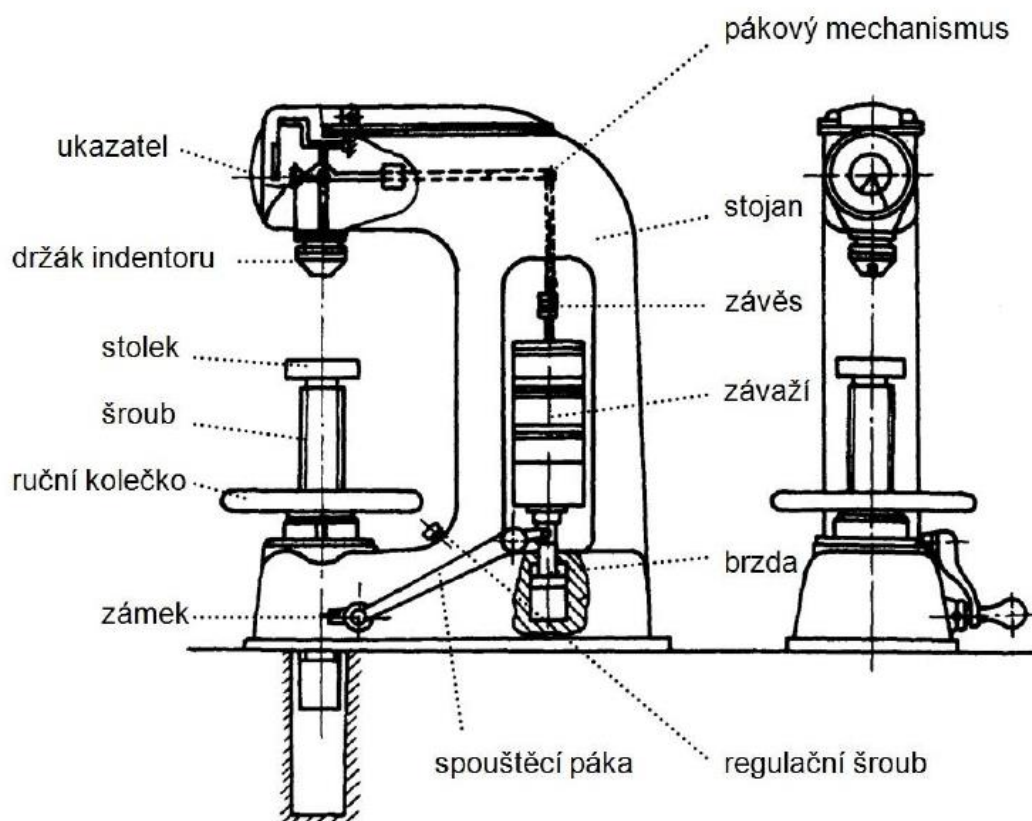
Hodnoty tvrdosti naměřené pomocí Rockwellovy metody nelze převést na tvrdosti podle jiných metod nebo na pevnost v tahu.

#### 1.2.2.4 Zkušební zařízení pro metodu Rockwell

Standartní Rockwellův tvrdoměr se skládá s tuhého rámu, ten nese nastavitelný držák s kruhovou deskou o průměru minimálně 50 mm pro zkušební těleso. Dále měřícího indentoru s držáky, a zařízení pro aplikaci různých zatížení na indentor bez rázu.

Tvrdoměr má 15 stupnic pro materiály různých tvrdostí. Stupnice M, L a R se používají pro plastické hmoty. Stupnice E se používá pouze pro kalibraci. Základní stupnice je stupnice M. Pokud se při plném zatížení naměří víc, než 150 dílků znamená to, že je materiál příliš měkký a použije se stupnice L. Pokud se to opakuje a opět se naměří taková vysoká hodnota, tak se použije stupnice R.

Měřící indentor se nesmí během zkoušky deformovat ani jinak poškodit. Indentor je spojen s číselníkovým úchylkoměrem pro měření hloubky s přesností na 0,001 mm. [3]



Obr. 8 Schéma Rockwellova zkušebního zařízení



Obr. 9 Přístroj Struers DuraJet pro měření tvrdosti dle Rockwella [8]

### 1.2.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Metodu vyvinuli R. L. Smith a G. E. Sandland v roce 1922. Název si metoda získala podle firmy Vickers, ve které byl vytvořen první tvrdoměr pro tuto metodu. V Evropě se jedná o nejrozšířenější vnikací zkoušku. Zkouška je velmi podobná Brinellově metodě. Nejzásadnější rozdíl je že místo kuličky se používá vnikací těleso jehlanovitého tvaru s čtvercovou základnou.

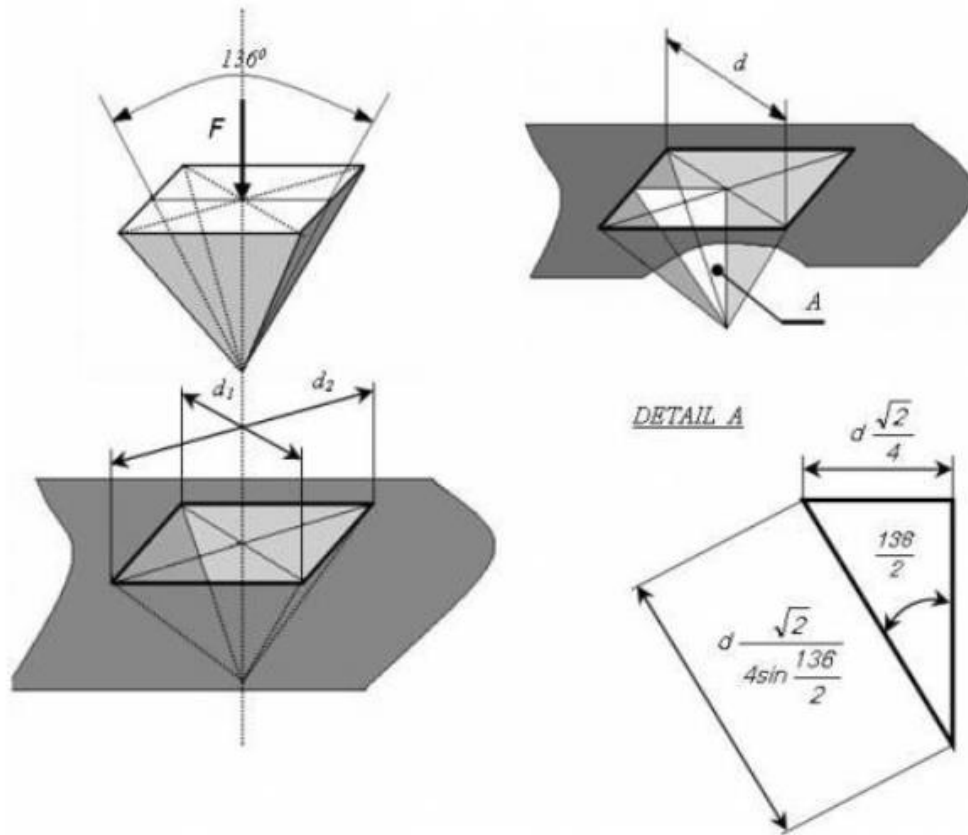
#### 1.2.3.1 Princip metody

Zkoušku tvrdosti a mikrotvrdosti podle Vickerse popisuje norma ČSN EN ISO 6507-1 pro 3 různé oblasti zatížení.

Tab. 1 Rozsah zkušebního zatížení [7]

Rozsah zkušebního zatížení, F [N]	Označení tvrdosti	Rozdělení zkoušek
$F \geq 49,03$	HV 5	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
$1,961 \leq F \leq 49,03$	HV 0,2 sž HV 5	Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkých zatížení
$0,09807 \leq F \leq 1,961$	HV 0,01 sž HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse

Princip této metody je založen na vtlačování čtyřbokého diamantového jehlanu s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  do materiálu. Měří se úhlopříčka vtisku u po odlehčení, pomocí které se vypočítá povrch vtisku. Vnikací těleso se vtlačuje do zkušební vzorku silou F působícím v kolmém směru na zkušební těleso. [9]



Obr. 10 Měření tvrdosti dle Vickerse [8]

U Vickersovy metody lze použít různá zatížení, aniž se změní hodnoty tvrdosti. Pouze pokud jsou zatížení malé, jsou zjišťované hodnoty větší.

### 1.2.3.2 Zkušební těleso

Při volbě zkušebního tělesa musíme dbát na to, aby výsledek měření nebyl ovlivněn okrajovými defekty, tvrdostí použité podložky a výškou vzorku. Také je nutné dodržet minimální tloušťku zkušebního vzorku. Pro to byl stanoven empirický vztah:

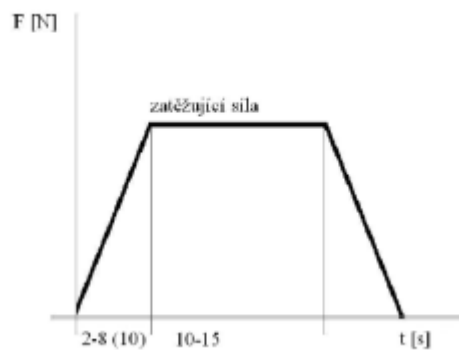
$$t = 1,945 \cdot \sqrt{\frac{F}{HV}} + 10h \quad (6)$$

Kde:  $F$  – zatěžující síla [N];  $h$  – hloubka vtisku [mm];  $HV$  – tvrdost dle Vickerse [3]

### 1.2.3.3 Provedení zkoušky

Pro dosažení nejpřesnějších hodnot je nutné se při zkoušení řídit dle normy ČSN EN ISO 291.

Zkouška by se měla provádět za teplot od 10°C do 35°C. Zkušební těleso musíme uložit na tuhou podložku, aby se během zkoušky nemohlo pohnout. Styčné plochy musí být zbaveny nečistot a cizích těles. Doba od počátku zatěžování až do jeho plné hodnoty musí být 2 až 8 sekund. Doba plného působení zatěžující síly se musí pohybovat od 10 do 15 sekund. [10]



Obr. 11 Průběh zatížení metody Vickers [10]

### 1.2.3.4 Zápis naměřených hodnot podle Vickerse

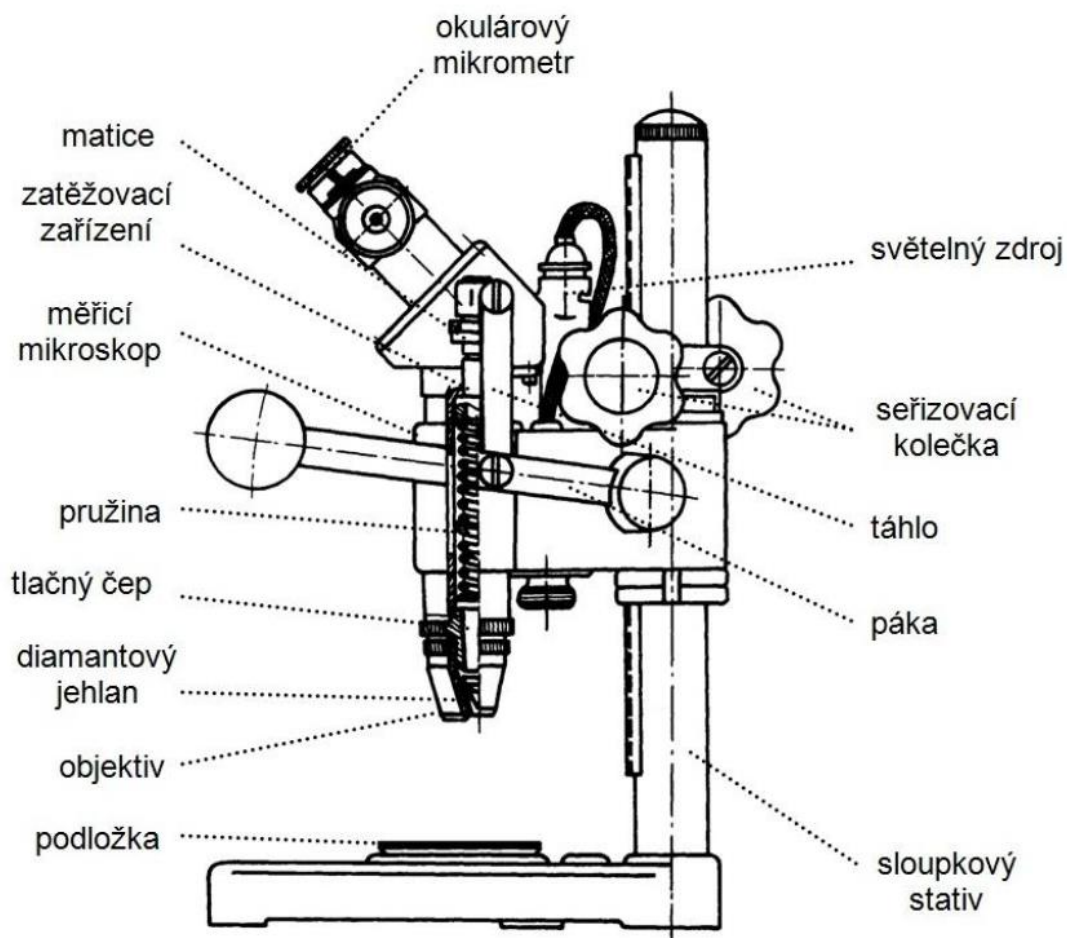
Naměřené hodnoty se zapisují podle následujícího schématu. Doba působení zkušebního zatížení se uvádí pouze v případě, že je odlišná od doby stanovené.

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

Obr. 12 Zápis hodnot zkoušky podle Vickerse [7]



### 1.2.3.5 Zkušební zařízení pro metodu Vickers



Obr. 13 Zkušební zařízení pro měření tvrdosti dle Vickerse [11]



Obr. 14 Přístroj Igitur 432/452 SVD na měření metodou Vickers [16]

### 1.2.3.6 Vyhodnocení zkoušky

Tvrдост dle Vickerse se spočítá poměrem zatížení  $F$  a plochy vtisku  $S$ .

Plochu vtisku  $S$  vypočítáme dle vztahu:

$$S = \frac{u^2}{2 \cdot \sin \frac{136}{2}} = \frac{u^2}{1,8544} \quad (7)$$

Tvrдост podle Vickerse je pak:

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

Kde:

$S$  – plocha vtisku [ $mm^2$ ]

$F$  – zatěžující síla [N]

$u$  – aritmetický průměr úhlopříček [mm]

$HV$  – hodnota tvrdosti podle Vickerse [MPa] [10]

### 1.2.4 Zkouška tvrdosti Shore

Metodou Shore se stanovují tvrdosti plastů a ebonitu. Vtlačuje se hrot tvrdoměru typu A pro měkké materiály a typu D pro materiály tvrdší. Lze měřit tvrdost až po uplynutí stanovené doby, na počátku vtlačování hrotu, nebo obojí. Při zkoušce je měřena hloubka vtlačení hrotu do vzorku materiálu za definovaných podmínek.

#### 1.2.4.1 Podstata metody

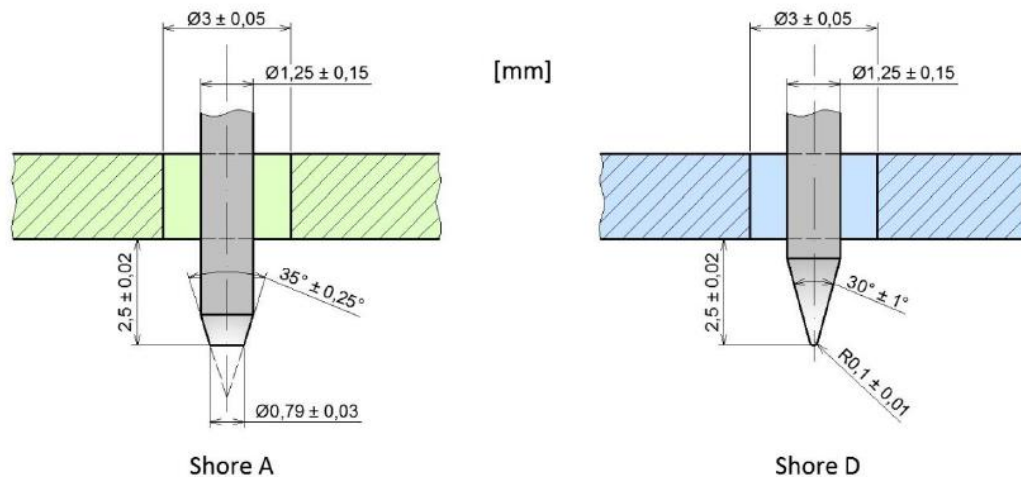
Měří se odpor materiálu proti vtlačování hrotu předepsaného tvaru. Hodnota tvrdosti závisí na modulu pružnosti, na viskoelastických materiálech a je nepřímo úměrná hloubce vtlačení hrotu.

Tvrdoměry Shore A se používají pro měkké elastomery a velmi měkké termoplasty.

Tvrdoměry Shore D se používají pro tvrdé elastomery a měkké termoplasty. Rozsahy hodnot tvrdosti jsou od 0 (pro plné vtlačení) do 100 (bez vtlačení).

#### 1.2.4.2 Zkušební zařízení

K měření pomocí metody Shore se používají dva typy tvrdoměrů, tvrdoměr typu A a typu D. Tvrdoměry jsou zatěžovány pomocí pružin, které je nutné před měřením kontrolovat a cejchovat. Tvrdoměr se skládá z opěrné patky, pružiny, ukazatele délky a zkušebního hrotu. Zkušební hrot tvoří tyčinka z kalené oceli. [12]



Obr. 15 Hroty tvrdoměrů Shore A a Shore D

Ukazatel délky slouží pro odečet vysunutí zkušební hrotu z opěrné patky. Je opatřen stupnicí, pomocí které lze odečítat délku vysunutí přímo v jednotkách od 0 do 100. Pružiny musí být kalibrovány tak, aby působili na hrot tvrdoměru specifikovanou silou. Tu lze vypočítat pomocí dvou rovnic odlišnými pro typ tvrdoměru A nebo D.

$$F = 550 + 750H_A \quad (9)$$

$$F = 455H_D \quad (10)$$

Kde:

$F$  – síla vtlačování [mN]

$H_A$  – hodnota tvrdosti na tvrdoměru A

$H_D$  – hodnota tvrdosti na tvrdoměru D [12]

#### **1.2.4.3 Zkušební tělesa**

Zkušební tělesa musejí mít minimální tloušťku 4 mm. Pokud má zkušební těleso méně, lze jej složit s více tenčích vrstev, aby se dosáhlo požadované tloušťky. U vícevrstvých zkušebních těles se nemusí výsledky shodovat s výsledky na zkušebních tělesech z jednoho kusu, protože u vícevrstvých nelze docílit dokonalého kontaktu mezi jednotlivými vrstvami.

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

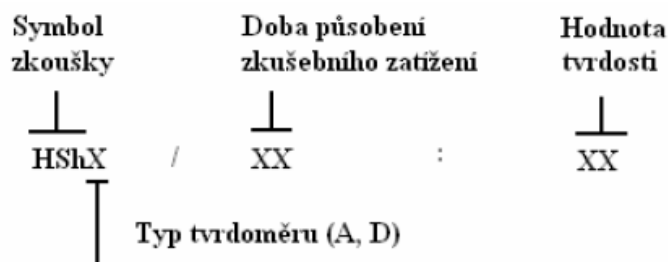
#### **1.2.4.4 Provedení zkoušky**

Zkušební těleso se položí na tuhý, rovný vodorovný povrch tak, aby se u zkoušky nepohnulo. Indentor se zatlačuje do zkušební tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu. Doba od počátku zatížení až do jeho plné hodnoty nesmí být menší jak 2 sekundy a větší jak 8 sekund. Doba plného zatížení musí být v rozmezí 10 – 15 sekund.

Vtisky musí být umístěny tak, aby vzdálenost středů dvou sousedních vtisků byla nejméně 3násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku (pro ocel, měď a její slitiny) a nejméně 6násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Vzdálenost středů každého vtisku od okraje zkušebního vzorku musí být nejméně 2,5násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku pro ocel, měď a její slitiny, a nejméně 3násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. [12]

#### 1.2.4.5 Zázpis naměřených hodnot

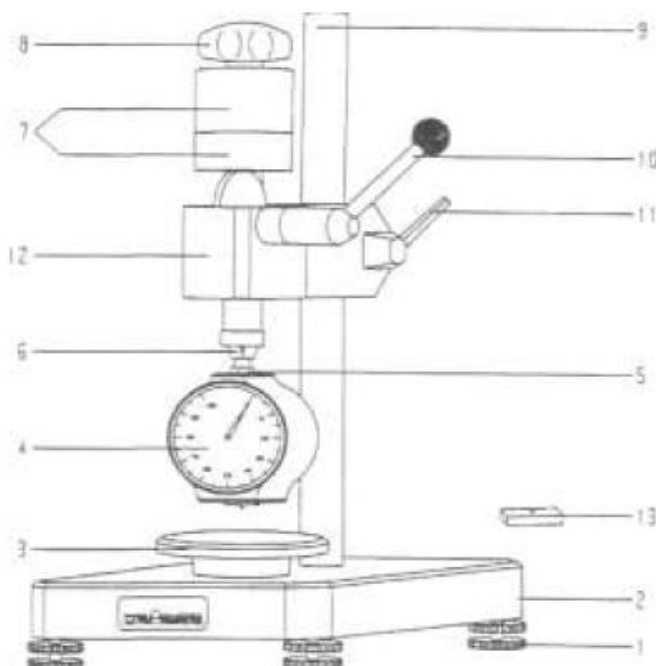
Naměřené hodnoty tvrdosti dle Shoreho se zapisují podle následujícího schématu:



Obr. 16 Zázpis metody Shore [12]



Obr. 17 Příklad přístroje Somex Sh A na měření tvrdosti metodou Shore [12]



Obr. 18 Schéma měřícího přístroje Shore [5]

#### Popis obrázku:

1, Rýhovaná patka; 2, Hliníkový podstavec; 3, Měřicí stůl; 4, Číselníkový úchylkoměr; 5, kloubová upínka; 6, Svírací kleština; 7, Závaží; 8, Matice; 9, Vodící sloupek; 10, Spouštěcí páka; 11, Zajišťovací páka; 12, Posuvný držák; 13, Kalibrační vzorek; 14, Demontovatelné závaží

#### 1.2.5 Metoda IRHD

Touto metodou lze změřit rychle tuhost pryže. Tvrdost se měří z hloubky vtlačení indentoru zatíženého specifikovanou silou ve zkušebním tělese z pryže. Tvrdost je vyjádřena v mezinárodních stupních tvrdosti pro pryž (IRHD). Rozsah metody je od 10 IRHD až po 100 IRHD.

##### 1.2.5.1 Princip metody

Měří se rozdíl mezi hloubkou vtlačení kuličky do pryže při malé kontaktní síle a velké vtláčovací síle. Zkoušku lze rozdělit na standartní metody měření tvrdosti a měření zdánlivé tvrdosti.

**Standartní metody:**

Tyto metody jsou prováděny na zkušebních tělesech stanovené nejmenší tloušťky a nejmenší velikosti. Rozdělují se na metody N, H, L a M.

**Metoda N** se nazývá normální zkouška, je vhodná pro měření pryže o tvrdosti 35-85 IRHD, připouští se použití i pro rozsah 30-95 IRHD.

**Metoda H** se nazývá zkouška pro vysoké tvrdosti. Používá se pro pryže o rozsahu tvrdosti 85-100 IRHD.

**Metoda L** se nazývá zkouška pro nízké tvrdosti. Používá se pro pryže o tvrdostech v rozsahu 10-35 IRHD.

**Metoda M** se nazývá zkouška mikrotvrdosti, je zmenšenou obdobou metody N. Je vhodná pro pryže o rozsahu tvrdosti 35-85 IRHD. Používá se především ke zkoušení malých a tenkých zkušebních těles. [13]

**Metody stanovení zdánlivé tvrdosti:**

Pro tento typ zkoušek jsou stanoveny 4 metody. Jsou to metody CN, CH, CL a CM. Metoda měření zdánlivé tvrdosti se provádí na finálním výrobku. Plocha finálního výrobku může být zakřivená, tloušťka pryže může být různá a boční rozměry neodpovídají nejmenší povolené vzdálenosti. Proto se hodnoty stanovené na standartních zkušebních tělesech a hodnoty stanovené na výrobcích neshodují. [13]

### 1.2.5.2 Zkušební zařízení

Použité síly a rozměry zkušebního zařízení jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 2 Zkušební síly a rozměry zkušebního zařízení [13]

Zkouška	Rozměry [mm]	Síla působící na kuličku			Síla působící na patku [N]
		Kontaktní [N]	Vtlačovací [N]	Celková [N]	
Metoda N (normální zkouška)	Kulička $2,50 \pm 0,01$ Patka $20 \pm 1$ Otvor $6 \pm 1$	$0,3 \pm 0,02$	$5,4 \pm 0,01$	$5,7 \pm 0,03$	$8,3 \pm 1,5$
Metoda H (vysoká tvrdost)	Kulička $1,00 \pm 0,01$ Patka $20 \pm 1$ Otvor $6 \pm 1$	$0,3 \pm 0,02$	$5,4 \pm 0,01$	$5,7 \pm 0,03$	$8,3 \pm 1,5$
Metoda L (nízká tvrdost)	Kulička $5,00 \pm 0,01$ Patka $22 \pm 1$ Otvor $10 \pm 1$	$0,3 \pm 0,02$	$5,4 \pm 0,01$	$5,7 \pm 0,03$	$8,3 \pm 1,5$
Metoda M (mikrozkouška)	[mm]	[mN]	[mN]	[mN]	[mN]
	Kulička $0,395 \pm 0,005$ Patka $3,35 \pm 0,15$ Otvor $1,00 \pm 0,15$	$8,3 \pm 0,5$	$145 \pm 0,5$	$153,3 \pm 1,0$	$235 \pm 30$

### 1.2.5.3 Zkušební tělesa

Horní i spodní povrchy tělesa musí být hladké, ploché a navzájem paralelní. Zkušební tělesa musejí být pro srovnání tvrdosti vyrobeny o stejné tloušťce.

Pro metodu N a H musejí mít standartní zkušební tělesa tloušťku 8-10 mm a musejí být vytvořeny vrstvami pryže. Nejtenčí vrstva musí mít tloušťku alespoň 2 mm. Zkušební tělesa nestandardní nesmí mít tloušťku menší než 6 mm. V tabulce níže jsou uvedeny minimální vzdálenosti bodu měření od okraje zkušebního tělesa.

Tab. 3 Minimální vzdálenosti bodu měření od okraje zkušebního tělesa [13]

Tloušťka zkušebního tělesa [mm]	Minimální vzdálenost měřicího bodu od okrajů zkušebního tělesa [mm]
4	7
6	8
8	9
10	10
15	11,5
25	13



#### **1.2.5.4 Provádění zkoušky**

Před prováděním zkoušky se musí horní i spodní povrch zkušební tělesa zaprášit separačním činidlem. Měřené těleso se umístí na pevný povrch a spustí se přítlačná patka. Poté se přitlačí zkušební kulička do povrchu zkušební tělesa po dobu 5 sekund. Měření by mělo být provedeno ve třech bodech na různých místech povrchu a tyto body by měli mít od sebe vzdálenost alespoň 6 mm.

Stupnice bývají provedeny v metrických jednotkách nebo v hodnotách mezinárodní stupnice IRHD.

U stupnice provedené v metrických jednotkách se zaznamená hloubka vtlačení kuličky po 30 sekundách působení zatěžující síly. Poté se tvrdost IRHD určí s tabulek nebo grafů.

U stupnice provedené v jednotkách IRHD se musí po 5 sekundách kontaktu přítlačné patky stupnice nastavit na hodnotu 100. Po dalších 30 sekundách zátěžové síly se odečte hodnota tvrdosti.

#### **1.2.5.5 Zápis hodnoty tvrdosti**

Tvrdost se vyjádří jako střední hodnota z jednotlivých měření, zaokrouhlená na nejbližší celé číslo. V mezinárodních stupnicích tvrdosti pryže se značí symbolem °. [13]

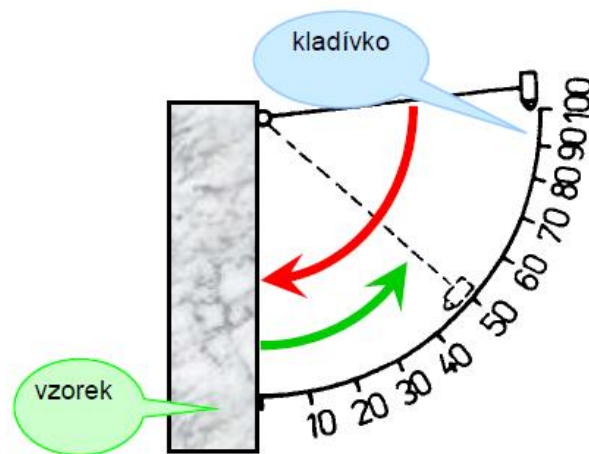
### **1.3 Dynamické zkoušky tvrdosti**

#### **1.3.1 Duroskop**

Zkouška je založena na elastické deformaci zkoušeného povrchu. Spuštění definovaného zkušební tělíska z úhlu  $\alpha$  na svislou stěnu zkoušeného materiálu. Po dopadu tělíska odskočí do úhlu  $\beta$ , který sledujeme. Zkoušku provádíme na povrchu rovném, hladkém, bez okují a cizích těles a bez mazadel. Tvrdost materiálu se určuje změřením úhlu odskoku  $\beta$ .

##### **1.3.1.1 Zkušební zařízení**

Zkušební zařízení se skládá s kladívka, které má na jednom konci ocelovou kuličku. Je umístěno na otočném rameni. Kladívko padá z určitého úhlu na zkoušený předmět, při zpětném odrazu sebou vezme kuličku, která nám ukáže úhel odrazu kladívka. Hodnota tvrdosti se odečítá přímo na stupnici. Nepřesnost měření tvrdosti je velká. [4]



Obr. 19 Schéma měření tvrdosti duroskopem [4]

### 1.3.2 Tvrdoměr Poldi

Je to nejmenší přenosný tvrdoměr pro měření metodou Brinell. Umožňuje stanovit tvrdost na základě plastické deformace vzniklé rázem. Velikost vtisku se porovnává s velikostí vtisku na materiálu o známé tvrdosti.

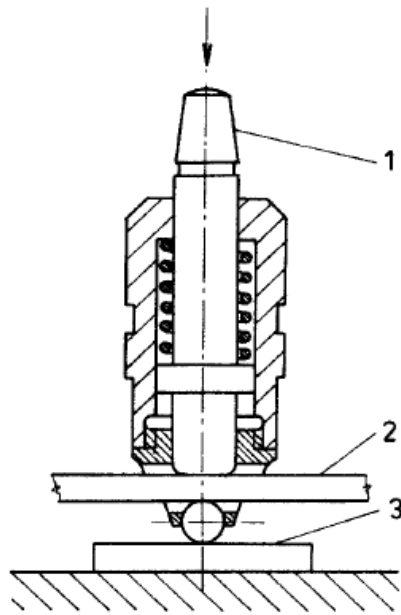
#### 1.3.2.1 Použití a popis

Využívá se především k měření tvrdosti na velkých výrobcích a konstrukcích, kde nelze využít měření na statickém nebo přenosném tvrdoměru. Jeho výhodami jsou hlavně malé rozměry, malá hmotnost a lze s ním měřit v jakékoliv poloze.

Skládá se s pouzdra a odpruženého pístu. Pouzdro je ukončeno držákem. V držáku je kulička o průměru 10 mm, mezi kuličkou a pístem je vložena porovnávací kalibrovaná tyčka čtvercového průřezu o hraně 11 mm a tvrdosti 200 HBS.

Měření se provádí tak, že se přístroj postaví kolmo k povrchu zkušebního materiálu a udeří se kladivem. Nárazem kladiva se vytvoří dva vtisky. Jeden na porovnávací tyčce a druhý na zkoušeném materiálu. Porovnáním obou vtisků lze podle tabulek dodávaných s tvrdoměrem určit výslednou tvrdost.

Chyba při měření touto metodou se pohybuje kolem 10 %.



Obr. 20 Kladívko Poldi [4]

### 1.3.3 Shoreho skleroskop

Tato metoda je založena na pružném odrazu tělesa o standartní hmotnosti, které padá z konstantní výšky na povrch. Určitá část energie se spotřebuje na plastickou deformaci povrchu tělesa a zbývající energie se spotřebuje odrazem tělesa. Z dosažené výšky po odrazu se spočítá hodnota tvrdosti. Hodnota tvrdosti se zapisuje jako HSh.

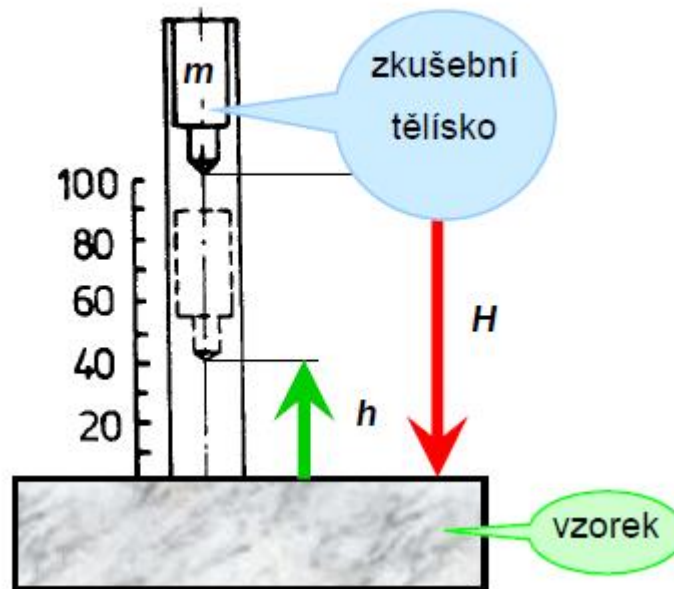
#### 1.3.3.1 Vyhodnocení

K udělení počáteční energie se používá elektromagnetické pole nebo energie pružiny. Zkouška se vyhodnocuje elektronicky. Výsledek lze přepočítat i na jiné stupnice tvrdosti. Přesnost závisí především na modulu pružnosti zkoušeného hladkosti povrchu, hmotnosti zkoušeného předmětu, a kolmosti dopadu tělíska.

#### 1.3.3.2 Zkušební zařízení

Jako zkušební zařízení se používá Skleroskop. Skládá se ze skleněné trubky. V ní se pohybuje tělísko, které má hmotnost 2,5 g. Tělísko je na spodní části zakončeno kulovitě zabroušeným diamantem a padá volně z výšky 254 mm. Za trubkou je stupnice, která udává stupně tvrdosti dle Shoreho. 1 dílek DSh = 100, odpovídá výšce odrazu od tvrdé kalené oceli.

Při měření musí být přístroj umístěn kolmo k jeho povrchu a zkoušený materiál musí být v místě zkoušení hladký. Při zkoušce nesmí zkušební těleso dopadnout 2x na stejné místo aby nebyl zkreslen výsledek měření. [4]



Obr. 21 Shoreho skleroskop – schéma [4]

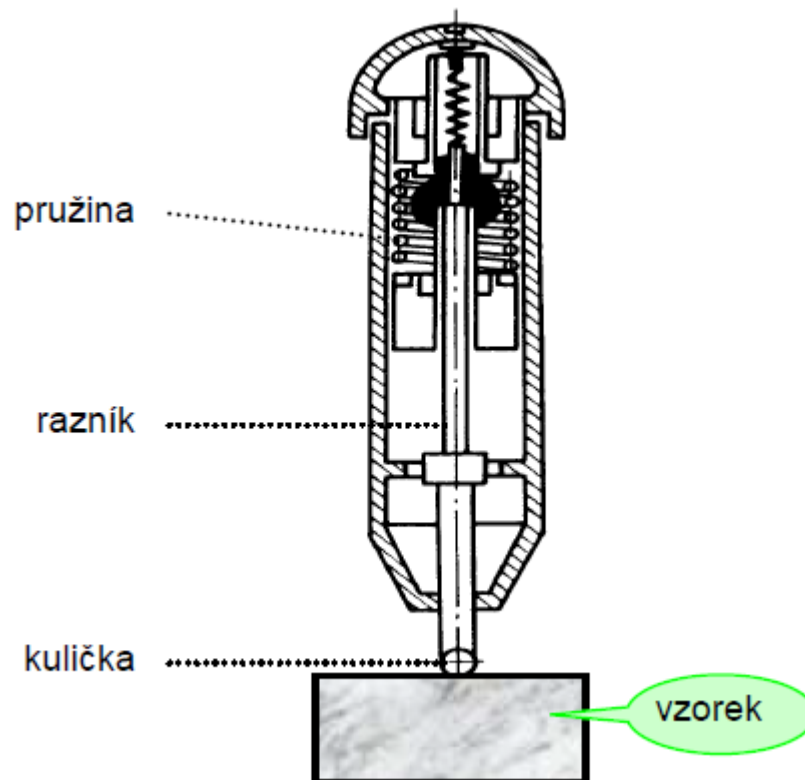
#### 1.3.4 Baumannovo kladívko

Velmi často se používá ve výrobních procesech. Je to mobilní zařízení na měření tvrdosti. K úderu razníku na vnikací těleso ve tvaru kuličky a k jeho vtlačení do povrchu zkušební tělesa dojde odjištěním a spuštěním pružiny, která je součástí kladívka. Měří se průměr vtisku na povrchu materiálu. Zkoušený materiál musí mít hladký a rovný povrch bez okují, cizích tělísek a mazadel.

Jako vnikací těleso se používá kalená ocelová kulička o průměru 10 mm. Úderem razníku na vnikací těleso je vyvoláno zatížení  $F$ .

##### 1.3.4.1 Určení tvrdosti

Měří se dva kolmé průměry vtisku ve zkoušeném materiálu a z nich se následně spočítá aritmetický průměr. Ten se porovná s tabulkami a následně se určí výsledná tvrdost, která se zapisuje jako HB BAUMANN. [4]



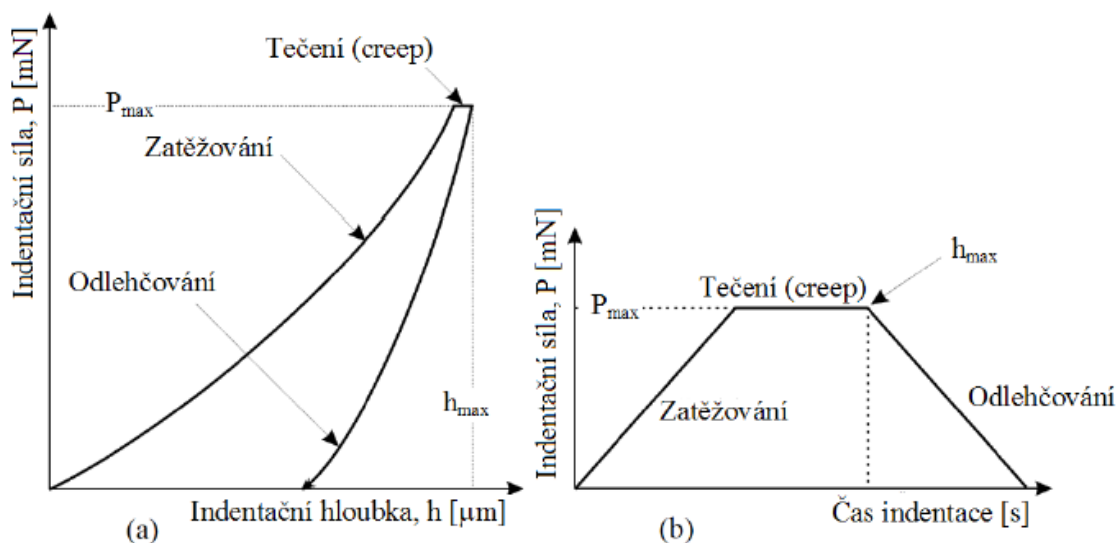
Obr. 22 Baumannovo kladívko [4]

## 1.4 Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI

Vznikla v 70. letech dvacátého století. Jej autoři byli Bulichev a Alekin. Až v 80. letech ji vylepšil Oliver a Pharr. Vylepšili metodologii, analýzy a shromáždění dat. Oproti ostatním zkouškám tvrdosti je DSI novou metodou.

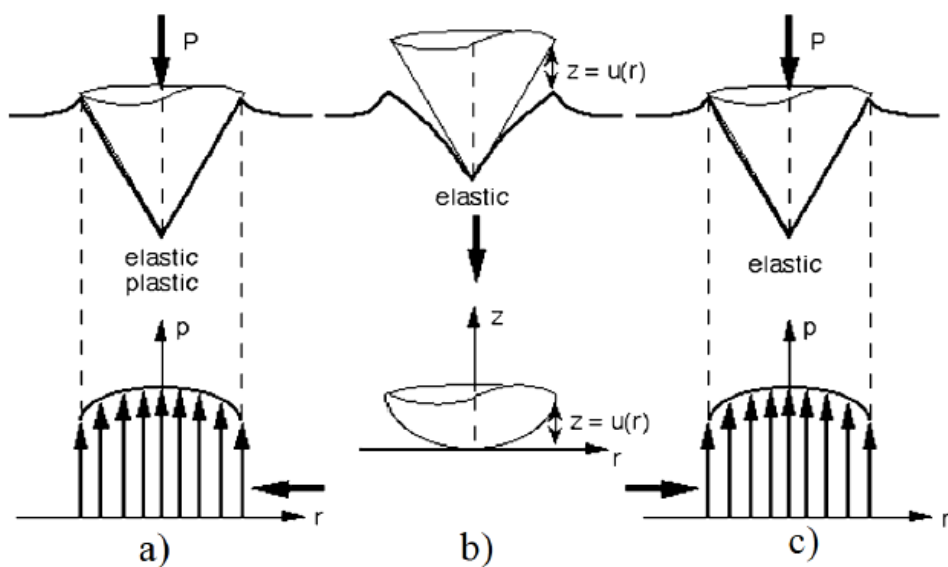
### 1.4.1 Princip metody

Principem je současná detekce okamžité změny hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu a nárůstu/poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Na obrázku 23 lze vidět charakteristickou indentační křivku zatížení-hloubka vtisku. První fáze je řízené zatěžování. Během něho je na indentoru definovanou rychlostí aplikována zatěžující síla. Druhá fáze je odlehčování, které spočívá v postupném snižování zatěžující síly až na nulovou hodnotu. Mezi zatěžování a odlehčování se také často vkládá prodleva, což je výdrž na aplikovaném zatížení, během níž je vzorek vystaven maximální zatěžující síle. To nám umožňuje zkoumat creep (tečení).



Obr. 23 Indentační křivka (a), časový diagram indentační křivky (b) [20]

Během zatěžování dochází k elasticko-plastické deformaci. Tvar vtisku odpovídá tvaru indentoru. Během odlehčování dochází k elastickému zotavení a tím pádem ke změně tvaru vtisku. Tvar vtisku poté neodpovídá tvaru indentoru. Během opětovného zatížení se kontaktní plocha postupně zvyšuje až do plného zatížení. Při opětovném zatížení a odlehčení nastává u obou procesů deformace elastická.



Obr. 24 Průběh zatěžování a odlehčování indentoru: a, zatížení; b, odlehčení; c, opětovné zatížení [20]

Pomocí DSI lze vyhodnotit elastický modul, lomovou houževnatost, tečení materiálu, fázové transformace a práci vynaloženou na vtisk.

#### 1.4.2 Metody zpracování indentačních dat

Předpokladem je pouze existence čistě elastického kontaktu. Ten vychází z Herzových rovnic. Při indentaci materiálů s čistě plastickým chováním má zatěžovací část indentační křivky také parabolický průběh a odlehčovací část je rovnoběžná se svislou osou.

Na popis případu indentace do elasticko-plastického materiálu zatím neexistuje teorie, která by jej přesně popisovala. Analytické řešení vede ke složitým nelineárním rovnicím s množstvím parametrů popisující chování materiálu.

První ucelenou koncepci učenou pro extrakci tvrdosti a elastického modulu z indentačních dat vytvořili Doerner a Nix. Jejich koncepce je založena na předpokladu, že počáteční fáze elastického odlehčování konického indentoru je podobný odlehčování materiálu válcovým indentorem.

Později na základě mnoha experimentů s různými materiály přišli Oliver a Pharr k závěru, že předpoklad přímky při odlehčování není zcela správný a navrhli odlehčovací křivky aproximovat mocninou funkcí.

#### 1.4.3 Tvrdost

Vtisková tvrdost  $H_{IT}$  je mírou rezistence k trvalé deformaci nebo poškození. Definuje se jako maximální zatěžující síla  $P_{max}$  podělené průmětem kontaktní plochy vnikacího tělesa se zkušebním tělesem  $A_p$ .

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} \quad (11)$$

$A_p$  se určí pro vnikací těleso podle Vickerse:

$$A_p = 24,50 \cdot h_c^2 \quad (12)$$

Martenzova tvrdost  $HM$  se určí z křivky zatížení/hloubka vtisku v oblasti kde roste zkušební zatížení.  $HM$  zahrnuje plastickou a pružnou deformaci. Je definována jako zatěžující síla  $P$  podělená plochou povrchu vnikacího tělesa  $A_s(h)$  ve vzdálenosti  $h$  od hrotu a je v  $N/mm^2$ :

$$HM = \frac{P}{A_s(h)} \quad (13)$$

Plocha  $A_s$  se určí pro vnikací těleso podle Vickerse:

$$A_s(h) = \frac{4 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot h^2 \quad (14)$$

Tvrdość HV podle Vickerse se určí:

$$HV = \frac{P_{max}}{9,81 \cdot A_c(h_c)} \quad (15)$$

#### 1.4.4 Modul pružnosti

Ze zkoušky metodou DSI lze také získat vtiskový neboli indentační modul  $E_{IT}$ , redukovaný modul  $E_r$  a komplexní modul  $E^*$ .

Vtiskový modul má v ideálním případě stejný význam jako elastický (Youngův) modul.

Vtiskový modul se určuje ze směrnice tečny sloužící k výpočtu vtiskové tvrdosti  $H_{IT}$ :

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (16)$$

$\nu_s$  - Poissonův poměr zkušebního tělesa, volí se pro kovové materiály 0,2 až 0,4 a pro polymerní 0,3 až 0,4

$E^*$  - komplexní modul

Redukovaný modul  $E_R$ :

$$E_R = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot C \cdot \sqrt{A_p}} \quad (17)$$

Kde:

$A_p$  – průmět kontaktní plochy

$C$  – kontaktní poddajnost

Komplexní modul  $E^*$  se určí z rovnice:

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (18)$$

Kde:

$E_i$  – modul vnikacího tělesa

$E_r$  – redukovaný modul vtiskového kontaktu

$\nu_i$  – Poissonův poměr vnikacího tělesa



### 1.4.5 Vtiskové tečení

Z hloubky vtisku při kontaktním zatížení se může vypočítat relativní hloubka vtisku, jedná se o hodnotu tečení materiálu (creep).

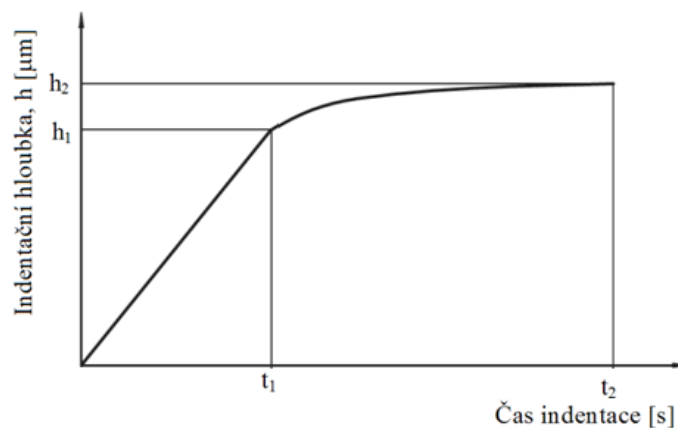
Vtiskové tečení  $C_{IT}$  se určí ze vztahu:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (19)$$

Kde:

$h_1$  – hloubka vtisku v čase  $t_1$ , kdy je dosaženo maximálního zatížení

$h_2$  – hloubka vtisku v čase  $t_2$ , při výdrži na dosaženém maximálním zkušebním zatížení



Obr. 25 Vyjádření vtiskového tečení [20]

### 1.4.6 Vtisková relaxace

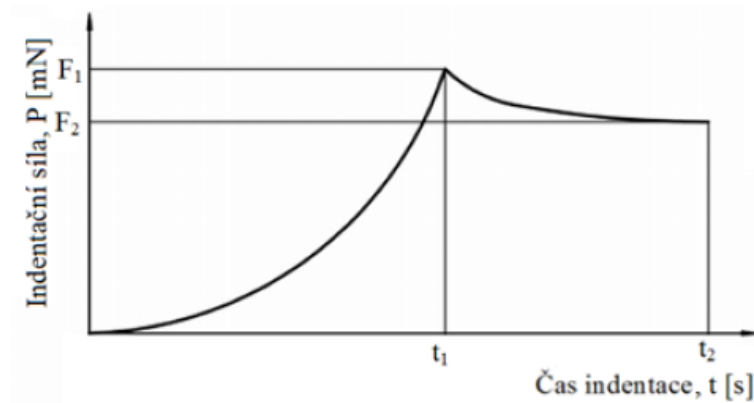
Relativní změna zkušebního zatížení, aneb hodnota relaxace  $R_{IT}$  se může vypočítat, jestliže se při konstantní hloubce vtisku měří změna zkušebního zatížení:

$$R_{IT} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad (20)$$

Kde:

$P_1$  – zatížení po dosažení hloubky vtisku, která je udržována na konstantní úrovni

$P_2$  – zatížení po čase, kdy byla hloubka vtisku udržována na konstantní úrovni



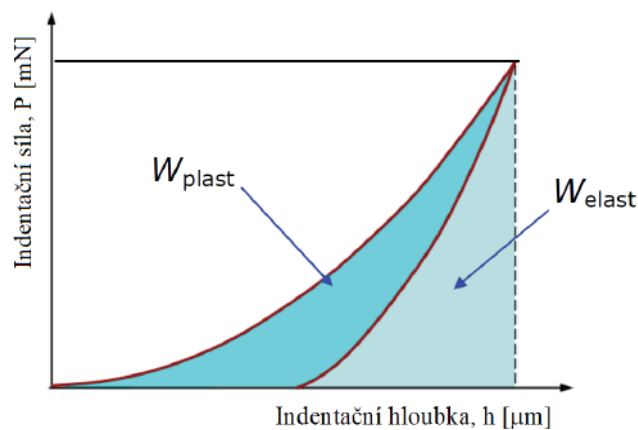
Obr. 26 Vyjádření vtiskové relaxace

### 1.4.7 Deformační práce

Indentační křivka je zdroj velkého množství informací. Celková práce spotřebovaná v průběhu indentačního cyklu  $W_{total}$  je rovna ploše pod zatěžovací křivkou. Nevratnou plastickou deformaci  $W_{plast}$  udává plocha mezi zatěžovací a odlehčovací křivkou, a plocha pod odlehčovací křivkou je vratná elastická práce  $W_{elast}$ . Koeficient zpětné relaxace  $\eta_{IT}$  je podíl elastické práce  $W_{elast}$  a celkové práce  $W_{total}$ . [20]

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \quad (21)$$

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 \quad (22)$$



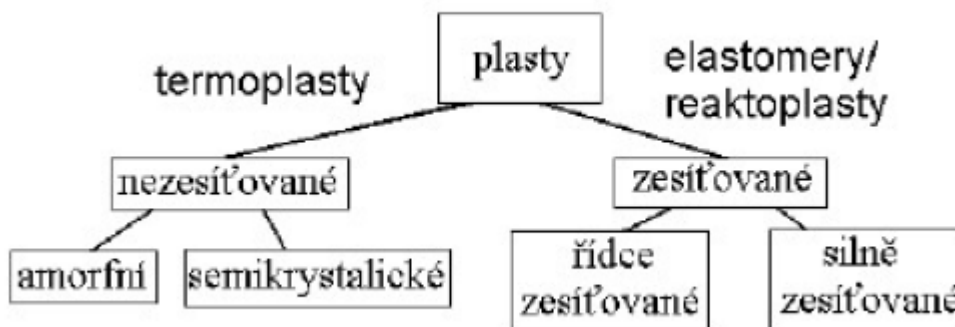
Obr. 27 Indentační křivka – deformační práce [20]

## 2 POLYMERY

Polymery jsou makromolekulární látky, vznikající z mnoha jednodušších dílů sloučeniny. Jsou charakterizovány specifickými vlastnostmi příslušejícím molekulám s dlouhou řetězovou strukturou. V té se mnohonásobně opakuje jedna nebo více základních složek – merů. Polymery se tedy vyrábí s monomeru. Monomer je látka, která má nízkou molekulovou hmotnost a vhodnou chemickou strukturu. [14]

### 2.1 Rozdělení polymerů

Polymery se dělí do dvou základních skupin: Plasty a Elastomery, plasty se dále dělí na termoplasty a reaktoplasty.



Obr. 28 Základní rozdělení polymerů [15]

#### 2.1.1 Termoplasty

Jsou složeny s jednotlivých makromolekul, které jsou vzájemně poutány jen fyzikálními vazbami, tzn., že molekuly jsou k sobě přitahovány mezimolekulárními silami.

Při zahřívání přecházejí termoplasty do plastického stavu, do stavu vysoce viskózních nenevtonovských kapalin. Poté jdou snadno tvářet a zpracovávat.

Ochlazením pod teplotu tání  $T_m$  a teplotu viskózního toku  $T_f$  dojdou do tuhého stavu. Proces měknutí a tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, protože při zahřívání nedochází ke změně chemické struktury.

Mezi termoplasty patří většina zpracovávaných hmot, jako PE, PP, PVC, PS, PA atd.

### 2.1.2 Reaktoplast

Tyto polymerní materiály nazýváme termosety. V první fázi zahřívání měknou, ale lze je tvářet jen omezenou dobu. Při dalším zahřívání dochází k vytvrzení.

Ochlazují se mimo formu kvůli zajištění rychlého ochlazení, které by bylo ve formě obtížné. Vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, a následným ohříváním dochází k degradaci materiálu. Tzn. děj je nevratný.

Mezi reaktoplasty patří např. epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, fenolformaldehydové hmoty atd.

### 2.1.3 Elastomery

Je to polymerní materiál, který se v první fázi zahřívání měkne a omezenou dobu jej lze tvářet. Během zahřívání dochází k prostorovému zesíťování struktury, probíhá vulkanizace. [17]

## 2.2 Rozdělení polymerů podle tvaru makromolekulárních řetězců

### 2.2.1 Lineární polymer (a)

Jednotlivé monomery jsou seřazeny vedle sebe. Vytvářejí jednoduchý řetězec. Z prostorových důvodů se mohou více přiblížit k sobě a vyplnit tak kompaktnější prostor. Mají vyšší hustotu.

### 2.2.2 Rozvětvený polymer (b)

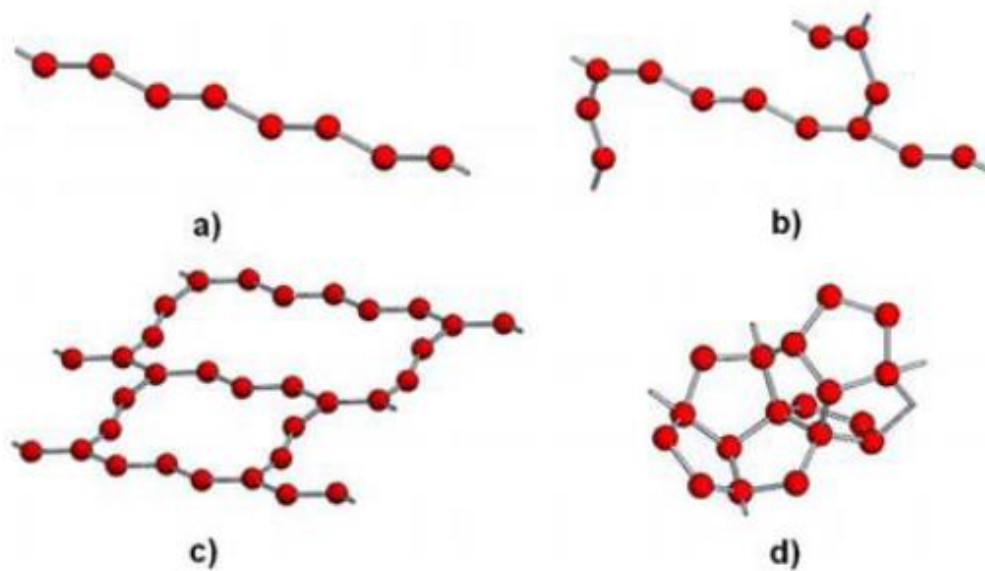
Na hlavním řetězci jsou boční větve. Rozvětvené makromolekuly se nemohou kvůli bočním větvím k sobě více přiblížit. Mají tedy nižší hustotu.

### 2.2.3 Zesíťovaný polymer (c)

Několik přímých nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců je mezi sebou spojeno vazbami. Vytvářejí tedy jednu makromolekulu – prostorovou síť. Vyznačují se vysokou tvrdostí, tuhostí a odolností proti zvýšené teplotě. Ale mají nízkou odolnost proti rázovému namáhání.

### 2.2.4 Prostorově zesíťovaný polymer (d)

Trojrozměrné monomery. Mají tři aktivní kovalentní vazby, které vytvářejí trojrozměrnou síť. Patří mezi ně např. epoxidy a fenolformaldehydy. [17]



Obr. 29 Tvary makromolekulárních řetězců

## 2.3 Dělení polymerů z hlediska aplikací

### 2.3.1 Standartní použití

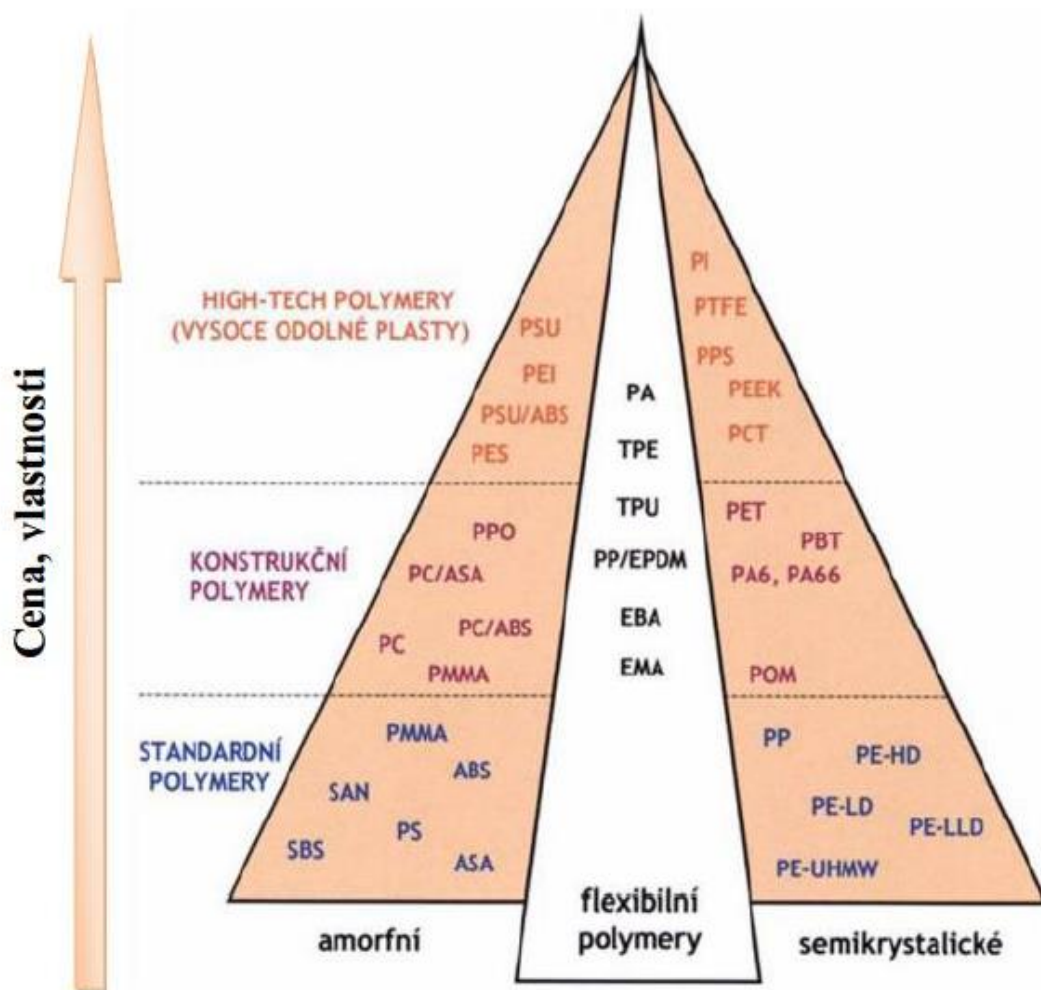
Součást běžného života, např. PVC, fólie atd. Patří mezi ně i polyolefiny jako PE, PP, PS, PVC, PF a UF.

### 2.3.2 Konstrukční plasty

Použití pro namáhavější součásti, jako ozubená kola z polyamidu, ve stavebnictví tyče a profily z POM, PMMA.

### 2.3.3 High-tech plasty

Plasty odolávající chemickým vlivům, vysokým teplotám a velkému namáhání. Nejčastější použití je v letectví, chemickém, kosmickém a také automobilovém průmyslu. Patří sem např. PBI, PEI, PSU, PI, PPS, PTFE atd.



Obr. 30 Rozdělení polymerů dle jejich aplikace a nemolekulární struktury

### 3 POLYAMID

Polyamidy se používají k výrobě namáhaných součástí. Patří mezi konstrukční plasty. Lze je používat v širokém rozsahu teplot, vynikají také vysokou mechanickou pevností při statickém i dynamickém namáhání a nízkým tečením i při dlouhodobém namáhání.

Polyamidy se označují čísly, charakterizující počet atomů uhlíku výchozích sloučenin. [18]

#### 3.1 Rozdělení polyamidů

Podle způsobu výroby je lze dělit na tyto skupiny:

- Polyamidy obsahující v řetězci aromatické jádro
- Polyamidy vícesložkové
- Polyamidy na bázi  $\omega$ -aminokyselin a jejich laktonů
- Polyamidy na bázi dikarboxylových kyselin a diamantů

#### 3.2 Vlastnosti polyamidu

V přírodním stavu mléčné, houževnaté, s dobrými kluznými vlastnostmi a odolné proti opotřebení.

Málo viskózní taveninu tvoří standartní polyamidy, které mají polymerační stupeň asi 150 až 300, vysokomolekulární polyamidy s polymeračním stupněm 500 až 600 mají až desetinásobnou viskozitu taveniny než standartní polyamidy.

Vysokomolekulární polyamid má širší obsah bodu měknutí. Polyamidy musí být k oxidační degradaci dostatečně stabilizovány, protože jsou citlivé na styk vzdušného kyslíku s taveninou polyamidu.

Polyamidy se nerozpouštějí v běžných rozpouštědlech, mají výbornou odolnost proti oděru a malý koeficient tření.

Navlhavost polyamidů je jejich negativní vlastnost, která ovlivňuje rozměrovou stabilitu výstřiku. Sklonem k absorpci vody se jednotlivé druhy dost liší. Proto se pro rozměrově přesné výrobky používají méně navlhavé typy (PA 11, PA 12) před levnějšími ale více navlhavými (PA 6, PA 6,6)

Polyamidy s vyšším číselným označením se vyznačují velkou odolností vůči oděru a velkou pevností. Se stoupajícím typovým číslem klesá stupeň krystalinity, bod tání a nasákavost a ohebnost vzrůstá.

Polyamidy mají také dobrou barvitelnost v různých odstínech. U typů s přísadami a plnivý jsou možnosti barev neomezené. [18]

### 3.3 Výroba polyamidu

Převážně se připravují polykondenzací diaminů a dikarbonových kyselin. Dále také polykondenzací aminokarbonových kyselin s šesti, jedenácti nebo dvanácti atomy uhlíku v přítomnosti vody, popřípadě iontovou polymerací, kterou lze provádět přímo ve formě, vzniká pak tzv. alkalický polyamid.

Polyamidy se vyrábějí v různých modifikacích, včetně plněných a lehčených typů. Takto vzniká široká škála plastů určených pro nejrůznější použití jako např.:

- Ložiska
- Ochranné přilby
- Ozubená kola

### 3.4 Atmosférické stárnutí polyamidu

Polyamidy se vyznačují malou odolností proti povětrnostním podmínkám. Dochází k změnám barvy a tvorbě trhlinek, které představují vážné narušení materiálu a to již po pár měsících vystavení přímému účinku slunečního záření za působení kyslíku, vlhkosti a kyselých reaktivních plynných nečistot.

Nejprve se trhlinky tvoří na povrchu, který je vystaven přímému slunečnímu záření a poté se rozšiřují i na stranu, která mu přímo vystavená není. Trhlinky poté pronikají do větší hloubky.

Při použití za nepřístupu světla nebo v místnosti s rozptýleným světlem a při normální teplotě se chemické složení polyamidu nemění.

Pomocí směsi jodidu draselného a naftenátu měďnatého lze zvýšit odolnost polyamidu proti povětrnostnímu stárnutí. Dobré stabilizační účinky vykazuje octan měďnatý a octan manganatý. Vysoké stabilizační účinnosti dosahují aktivní saze. [19]



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo měření nanotvrdosti povrchové vrstvy polyamidu 12, modifikovaného beta zářením. Do polyamidu bylo přidáno síťovací činidlo TAIC v množství 5% objemových procent. Síťovací činidlo TAIC (ve formě granulí) bylo implementováno do polyamidu v množství 5 objemových procent. Celkový proces přípravy prováděla firma PTS Plastic Technologie Service, Hautschenmühle 3, Adelshofen, Deutschland.

Testovaná zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování na vstřikovacím stroji ARABURG ALLROUNDER 470C. Zkušební tělesa byla následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, a 99 kGy. Měření nanotvrdosti proběhlo na nanotvrdoměru (NHT2) – Opx/Cpx od firmy CSM Instruments, při zatížení 10mN. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cíle bakalářské práce byly následující:

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

## 5 PŘIPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

### 5.1 Vstřikovací stroj

Pro vstřikování byl použit horizontální vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 C Advance.



*Obr. 31 Arburg Allrounder 470 C Advance*

Stroj se používá pro vstřikovací jednotky 350, které jsou koncipovány modulárně. Ve vybavení stroje je plastikační komora s regulací vstřikování.

#### 5.1.1 Vstřikovací podmínky

Parametry pro vstřikování jsou uvedeny v tabulce:

*Tab. 4 Vstřikovací podmínky*

	<i>PA12 V-PTS-CREAMID 12- AMN 0 TLD *M800/13 natur</i>
<b>Parametr</b>	
vstřikovací rychlost/mm.s-1/	45
vstřikovací tlak /MPa/	62
doba chlazení /s/	17
teplota formy /°C/	70
dráha dávkování /mm/	25
celkový čas dotlaku /s/	10,2
dotlak/MPa/	-
teplota trysky /°C/	310
teplota pod násypkou /°C/	40
teplotní pásmo 2 /°C/	220
teplotní pásmo 3 /°C/	250
teplotní pásmo 4 /°C/	270
teplotní pásmo 5 /°C/	280
teplota trysky /°C/	310

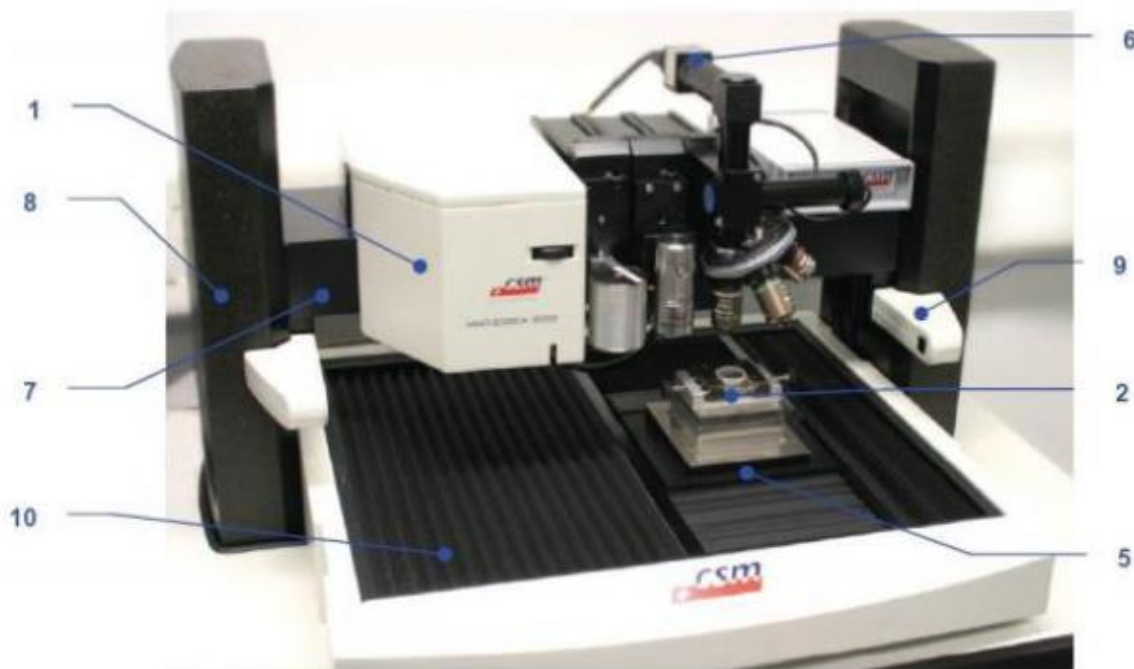
## 6 MĚŘENÍ NANOTVRDOSTI

Měření nanotvrdoměru proběhlo na nanotvrdoměru (NHT2) – Opx/Cpx od firmy CSM Instruments, při zatížení 10mN.

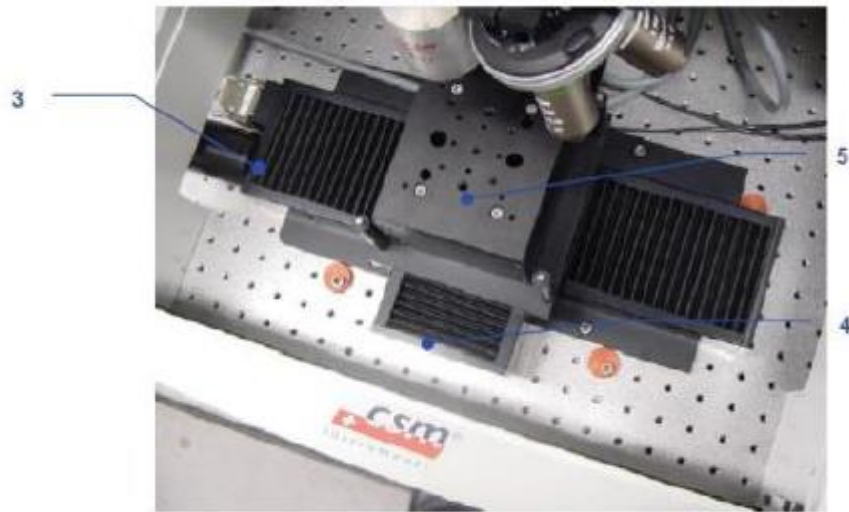


Obr. 32 Přístroj NHT2 – Opx/Cpx

### 6.1.1 Popis přístroje



Obr. 33 Popis přístroje NHT2 – Opx/Cpx



Obr. 34 Popis přístroje NHT2 – Opx/Cpx 2

1- Měřící hlava

2- Univerzální držák vzorků

3- X posun

4- Y posun

5- Z posun

6- Optický mikroskop

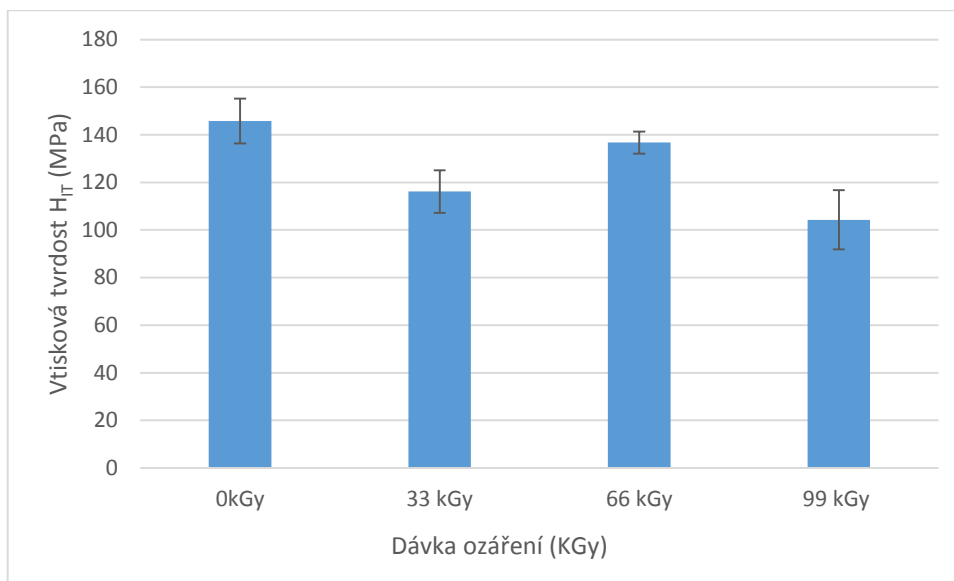
7- Modulová hlava

8- Anti- vibrační sloup

9- Optický senzor

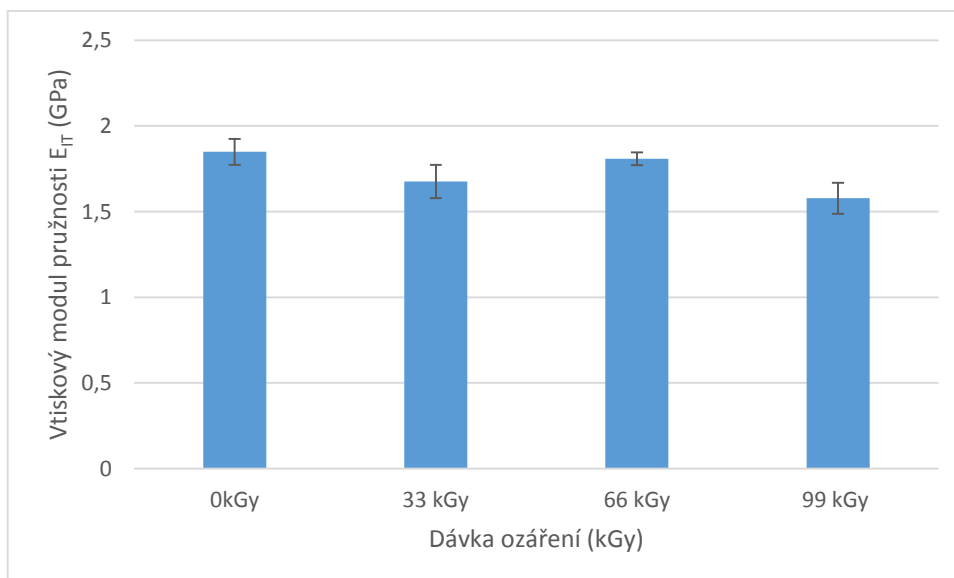
10- Horní kryt stolu

## 7 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT



Obr. 35 Vtisková tvrdost  $H_{IT}$

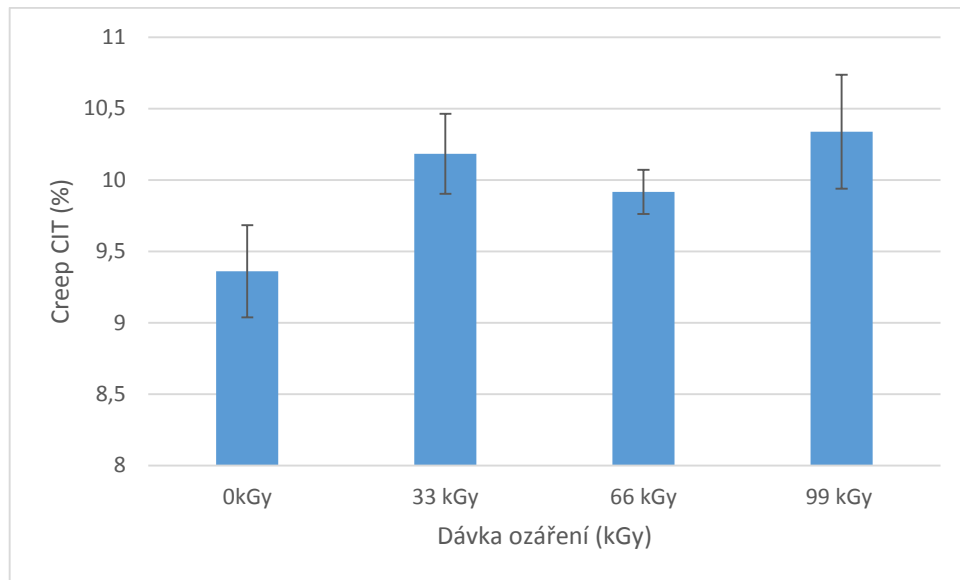
Při zkoušce nanotvrdosti bylo zjištěno, že nejmenší hodnoty vtiskové tvrdosti byly naměřeny u PA 12 ozářeného dávkou záření 99 kGy (104,3 MPa), naopak nejvyšších hodnot vtiskové tvrdosti bylo dosaženo u neozářeného PA 12 (145,8 MPa), jak je patrné z obrázku 35.



Obr. 36 Vtiskový modul pružnosti  $E_{IT}$

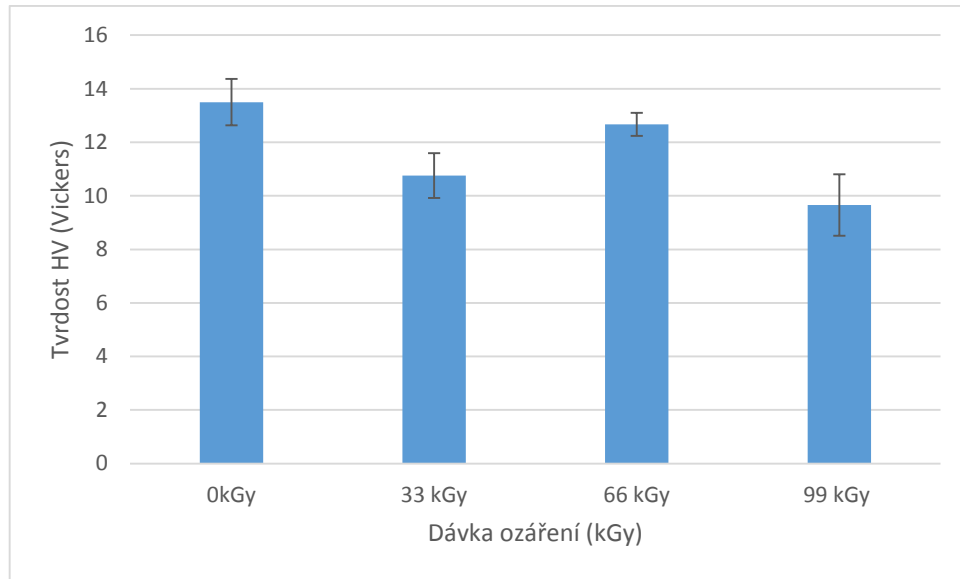
Výsledky testu nanotvrdosti ukázaly, že nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti, který nám reprezentuje tuhost testované povrchové vrstvy, byla zjištěna u testovaného zku-

šebního tělesa ozářeného dávkou záření 0 kGy (1,8 GPa). Naopak nejmenší hodnota mikro-  
tuhosti byla naměřena u zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 99 kGy (1,6 GPa),  
jak je patrné z obrázku 36.



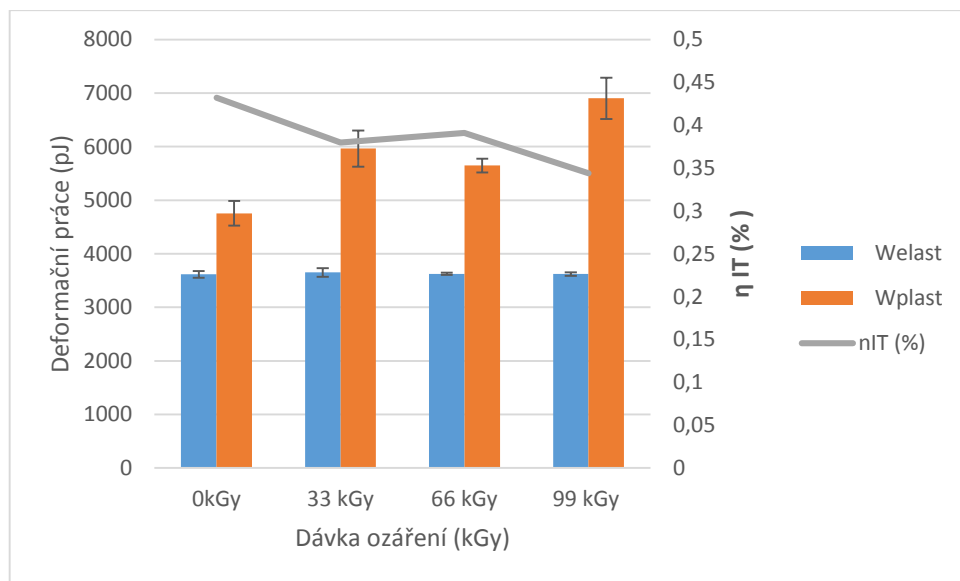
Obr. 37 Creep  $C_{IT}$

Výslednými hodnotami vtiskového tečení, které reprezentuje mikrokríp bylo zjištěno, že  
nejvyšší hodnota mikrokrípu byla naměřena u testovaného zkušebního tělesa, ozářeného  
dávkou beta záření 99 kGy (10,3 %). Nejmenší hodnoty mikrokrípu bylo dosaženo u neozá-  
řeného zkušebního tělesa (9,4 %) jak lze vidět na obrázku 37.



Obr. 38 Tvrdość HV

Z obrázku 38 lze vidět, že nejnižší hodnoty tvrdosti dle Vickerse dosahuje vzorek ozářený dávkou 99 kGy, a to 9,66 HV. Nejvyšší hodnoty dosahuje vzorek neozářený, a to 13,50 HV.



Obr. 39 Elastická část práce vtisku  $W_{elast}$ , plastická část práce vtisku  $W_{plast}$  a koeficient zpětné relaxace  $\eta_{IR}$ .

Z obr. 39 lze vyčíst, že nejmenší naměřenou hodnotu pro elastickou část práce vtisku má neozářený vzorek, a to 3616,56 pJ. Nejvyšší hodnota u elastické části vtisku je 3652,10 pJ u vzorku ozářeného dávkou 33 kGy.

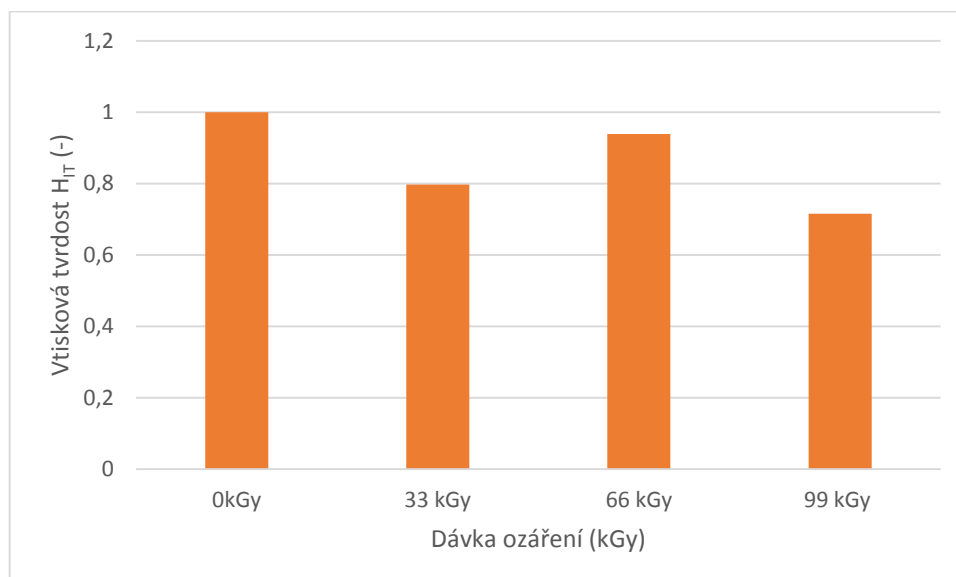


Nejnižší hodnota plastické části práce vtisku 4754,87 pJ byla naměřena u neozářeného vzorku. Nejvyšší hodnota plastické části práce vtisku 6903,57 pJ byla naměřena u vzorku ozářeného dávkou 99 kGy.

Při měření koeficientu zpětné relaxace  $\eta$  byla naměřena nejnižší hodnota 0,34 % u vzorku, který byl ozářen dávkou 99 kGy. Nejvyšší hodnota koeficientu zpětné relaxace  $\eta$  0,38 % byla naměřena u vzorku ozářeného dávkou 33 kGy.

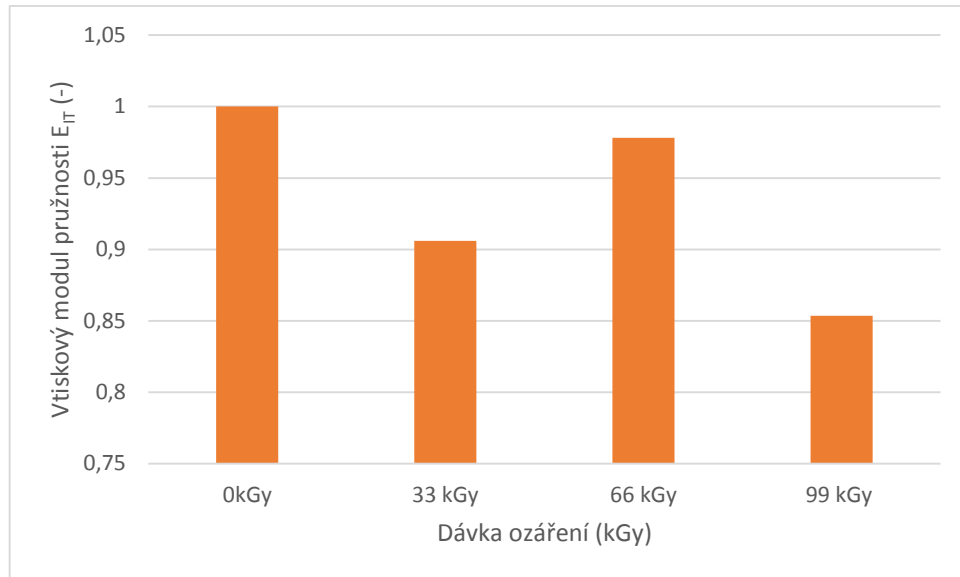
## 8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Bakalářská práce se zabývá měřením nanotvrdosti povrchové vrstvy polyamidu 12, modifikovaného beta zářením. Do polyamidu bylo přidáno síťovací činidlo TAIC v množství 5% objemových procent. Testovaná zkušební tělesa byla vyrobena technologii vstřikování na vstřikovacím stroji ARABURG ALLROUNDER 470C. Zkušební tělesa byla následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, a 99 kGy. Měření nanotvrdosti proběhlo na nanotvrdoměru (NHT2) – Opx/Cpx od firmy CSM Instruments, při zatížení 10mN. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny. Pro snadnější orientaci byly použity tzv. bezrozměrné hodnoty, vyjádřené jako poměr jednotlivých měření k hodnotě neozářeného vzorku v průběhu příslušného měření.



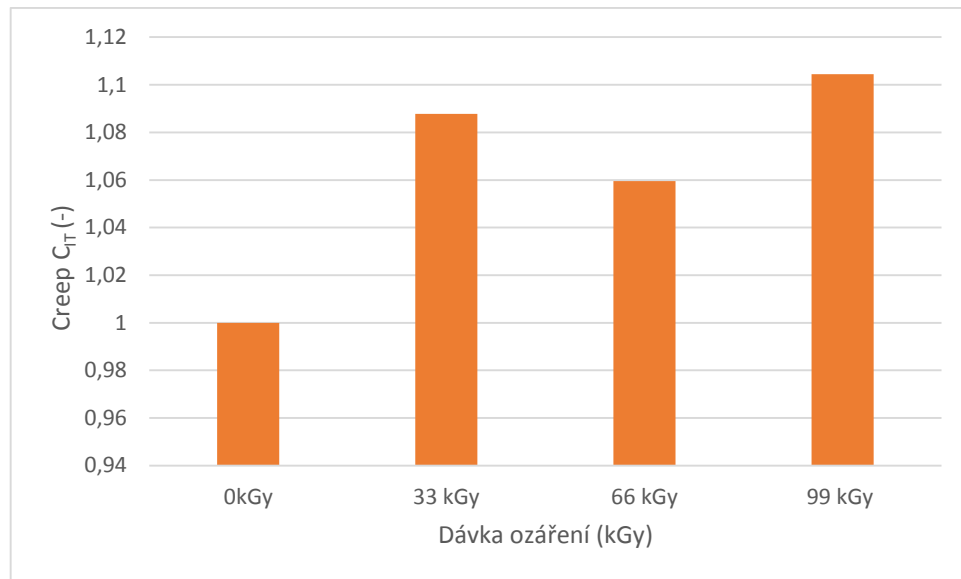
Obr. 40 Vtisková tvrdost  $H_{IT}$

Z výsledků měření nanotvrdosti je patrné, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti byly naměřeny u neozářeného testovaného zkušební tělesa. Naopak nejmenší hodnoty byly zjištěny u testovaného zkušební tělesa ozářeného dávkou beta záření 99 kGy. Při porovnání hodnot vtiskové tvrdosti neozářeného zkušební tělesa a zkušební tělesa ozářeného dávkou beta záření 99 kGy je patrné, že pokles hodnot vtiskové tvrdosti dosahuje v průměru 22%, jak je patrné z obrázku 40.



*Obr. 41 Vtiskový modul pružnosti  $E_{IT}$*

Výsledky měření vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované povrchové vrstvy zkušebního tělesa ukázaly, že nejvyšší hodnoty mikrotuhosti byly naměřeny u neozářeného testovaného zkušebního tělesa. Naopak nejmenších hodnot bylo dosaženo u testovaného zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 99 kGy. Pokles hodnot mikrotuhosti u zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 99 kGy vůči neozářenému testovanému zkušebnímu tělesu byl v průměru o 25%, jak je patrné z obrázku 41.



Obr. 42 Creep  $C_T$

Vtiskové tečení, které reprezentuje mikrokríp povrchové vrstvy testovaného zkušebního tělesa ukázalo, že jeho nejvyšší hodnota byla zjištěna u testovaného zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 99 kGy. Nejmenší hodnota mikrokrípu byla naměřena u neozářeného zkušebního tělesa. Nárůst hodnot mikrokrípu u dávky ozáření 99 kGy vzhledem k neozářenému testovanému zkušebnímu tělesu byl v průměru 11%, jak je patrné z obrázku 42.

## ZÁVĚR

Bakalářské práce se zabývá měřením nanotvrdosti povrchové vrstvy polyamidu 12, modifikovaného beta zářením. Do polyamidu bylo přidáno síťovací činidlo TAIC v množství 5% objemových procent. Testovaná zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikováním na vstřikovacím stroji ARABURG ALLROUNDER 470C. Zkušební tělesa byla následně ozářena beta zářením v dávkách 0, 33, 66, a 99 kGy. Měření nanotvrdosti proběhlo na nanotvrdoměru (NHT2) – Opx/Cpx od firmy CSM Instruments, při zatížení 10mN. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Výsledky měření nanotvrdosti ukázaly, že zářením testovaných zkušebních těles různými dávkami beta záření došlo ke zhoršení mikromechanických vlastností testované povrchové vrstvy. Vtisková tvrdost poklesla nejvíce u testovaných zkušebních těles ozářených dávkou beta záření 99 kGy. Pokles byl v průměru o 22% v porovnání s neozářeným zkušebním tělesem. U vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost došlo k poklesu jeho hodnot v průměru o 25% vůči neozářenému zkušebnímu tělesu. Nejvyšší pokles byl zaznamenán u dávky ozáření 99 kGy. Mikrokríp reprezentovaný vtiskovým tečením narostl u testovaného zkušebního tělesa ozářeného dávkou beta záření 99 kGy vůči neozářenému v průměru o 11%.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] SCHATZ, Miroslav, VONDRÁČEK, Petr. Zkoušení polymeru. 1. vyd. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1979. 264 s.
- [2] MOLLIKOVÁ, Eva. ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ [online]. 2005 [cit. 2011-02-02]. Dělení metod určování tvrdosti. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/2%20deleni%20metod%20urcovani%20tvrlosti.doc>>.
- [3] RYBNÍKÁŘ, F.; DITRYCH, Z.; Klácel, Z. et all.. Analýza a zkoušení plastických hmot. Praha : SNTL 1965, s 415 – 418.
- [4] TICHAVA, M.. Měření tvrdosti pryže a plastů v současném zkušebnictví: Technická zpráva VUGPT Zlín. Zlín 1985, s 31 – 34.
- [5] Skúšky tvrdosti [online]. 2011, [cit. 2011-20-1]. <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>
- [6] ČSN EN ISO 2039-2. Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 2 : Tvrdost dle Rockwella. Praha: Český normalizační institut, 2000. 12 s.
- [7] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. Stojírenská technologie 1 - 1. díl: Nauka o materiálu. 3. vyd. Praha: Scientia, 2002. 266 s.
- [8] Struers Česká republika [online]. 2011, [cit. 2011-22-1]. <http://www.struers.com/resources/elements/7/2991591.jpg>
- [9] PTÁČEK, Ludvík a kolektiv. Nauka o materiálu. 2. vyd. Brno: CERM-akademické nakladatelství. 520 s.
- [10] LUDVÍK, Jan, BÍLEK, Karel, LUDVÍK Štěpán. Zkoušky tvrdosti . 3. vyd. Kladno: Metrotest Kladno. 22 s.
- [11] MOLLIKOVÁ, Eva. ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ [online]. 2005 [cit. 2011-02-04]. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/zkouska%20tvrlosti%20podle%20vickerse.doc>>.
- [12] ČSN EN ISO 868. Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore). Praha : Český normalizační institut, 2003. 12 s.
- [13] ČSN ISO 48. Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tvrdosti (tvrdost mezi 10 IRHD a 100 IRHD). Praha : Český normalizační institut, 2008. 24 s.
- [14] RYBNÍKÁŘ, F. Makromolekulární chemie I, Brno VUT. 1987
- [15] MAŇAS, M., VLČEK, J., Aplikovaná reologie, 1. vydání, UTB Zlín, 2001. ISBN

80-7318-039-1.

- [16] Igitur spol. s. r. o. Louny [online]. 2011, [cit. 2011-23-1].  
[http://www.igitur.cz/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=43](http://www.igitur.cz/index.php?main_page=product_info&products_id=43)
- [17] Technologie II., [online], Technická univerzita Liberec, [cit.2012-12-15],  
WWW:[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm)
- [18] SOVA, M. – KREBS, J. a kolektiv: Termoplasty v praxi: aktuální stav červenec 2003, Verlag Dashöfer, 2003
- [19] KOLEKTIV AUTORŮ: Základy fyziky polymerů, Praha: Macro, 1998
- [20] Ovsík, Martin. Disertační práce, UTB Zlín

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$C_{IT}$	Vtiskový creep
$E_{IT}$	Vtiskový modul pružnosti
$F$	zatěžující síla
$h$	hloubka vtisku
$S$	plocha vtisku
$U$	aritmetický průměr úhlopříček
$H_A$	hodnota tvrdosti na tvrdoměru A
$H_D$	hodnota tvrdosti na tvrdoměru D
$A_p$	průmět kontaktní plochy
$C$	kontaktní poddajnost
$E^*$	Komplexní modul
$E_i$	modul vnikacího tělesa
$E_r$	redukovaný modul vtiskového kontaktu
$\nu_i$	Poissonův poměr vnikacího tělesa
$h_1$	hloubka vtisku v čase $t_1$
$h_2$	hloubka vtisku v čase $t_2$
$P_1$	zatížení po dosažení hloubky vtisku
$P_2$	zatížení po čase
$H_{IT}$	Hodnota vtiskové tvrdosti
$HV$	Hodnota tvrdosti dle Vickerse
$ISO$	Mezinárodní norma
$W$	Celková mechanická práce
$W_{elast}$	Elastická část práce
$W_{plast}$	Plastická část práce



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Druhy zkoušek tvrdosti .....</i>	13
<i>Obr. 2 Princip měření tvrdosti Brinellovou metodou .....</i>	14
<i>Obr. 3 Zápis hodnot zkoušky podle Brinella.....</i>	15
<i>Obr. 4 Tvrdoměr Poldi.....</i>	16
<i>Obr. 5 Rockwellova zkouška [5] .....</i>	17
<i>Obr. 6 Rockwellova stupnice [4] .....</i>	18
<i>Obr. 7 Zápis hodnot zkoušky podle Rockwella [7] .....</i>	19
<i>Obr. 8 Schéma Rockwellova zkušebního zařízení.....</i>	20
<i>Obr. 9 Přístroj Struers DuraJet pro měření tvrdosti dle Rockwella [8].....</i>	21
<i>Obr. 10 Měření tvrdosti dle Vickerse [8] .....</i>	23
<i>Obr. 11 Průběh zatížení metody Vickers [10] .....</i>	24
<i>Obr. 12 Zápis hodnot zkoušky podle Vickerse [7] .....</i>	24
<i>Obr. 13 Zkušební zařízení pro měření tvrdosti dle Vickerse [11] .....</i>	25
<i>Obr. 14 Přístroj Igitur 432/452 SVD na měření metodou Vickers [16].....</i>	26
<i>Obr. 15 Hroty tvrdoměrů Shore A a Shore D .....</i>	27
<i>Obr. 16 Zápis metody Shore [12] .....</i>	29
<i>Obr. 17 Přístroj Somex Sh A na měření tvrdosti metodou Shore [12] .....</i>	29
<i>Obr. 18 Schéma měřícího přístroje Shore [5] .....</i>	30
<i>Obr. 19 Schéma měření tvrdosti duroskopem [4].....</i>	34
<i>Obr. 20 Kladívko Poldi [4].....</i>	35
<i>Obr. 21 Shoreho skleroskop – schéma [4] .....</i>	36
<i>Obr. 22 Baumannovo kladívko [4] .....</i>	37
<i>Obr. 23 Indentační křivka (a), časový diagram indentační křivky (b) [20] .....</i>	38
<i>Obr. 24 Průběh zatěžování a odlehčování indentoru: a, zatížení; b, odlehčení; c, opětné zatížení [20] .....</i>	38
<i>Obr. 25 Vyjádření vtiskového tečení [20].....</i>	41
<i>Obr. 26 Vyjádření vtiskové relaxace.....</i>	42
<i>Obr. 27 Indentační křivka – deformační práce [20] .....</i>	42
<i>Obr. 28 Základní rozdělení polymerů [15].....</i>	43
<i>Obr. 29 Tvary makromolekulárních řetězců.....</i>	45
<i>Obr. 30 Rozdělení polymerů dle jejich aplikace a nemolekulární struktury .....</i>	46
<i>Obr. 31 Arburg Allrounder 470 C Advance .....</i>	51

<i>Obr. 32</i> Přístroj NHT2 – Opx/Cpx.....	52
<i>Obr. 33</i> Popis přístroje NHT2 – Opx/Cpx .....	52
<i>Obr. 34</i> Popis přístroje NHT2 – Opx/Cpx 2 .....	53
<i>Obr. 35</i> Vtisková tvrdost $H_{IT}$ .....	54
<i>Obr. 36</i> Vtiskový modul pružnosti $E_{IT}$ .....	54
<i>Obr. 37</i> Creep $C_{IT}$ .....	55
<i>Obr. 38</i> Tvrdost HV .....	56
<i>Obr. 39</i> Elastická část práce vtisku $W_{elast}$ , plastická část práce vtisku $W_{plast}$ a koeficient zpětné relaxace $\eta_{IT}$ .....	56
<i>Obr. 40</i> Vtisková tvrdost $H_{IT}$ .....	58
<i>Obr. 41</i> Vtiskový modul pružnosti $E_{IT}$ .....	59
<i>Obr. 42</i> Creep $C_{IT}$ .....	60

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Rozsah zkušebního zatížení [7] .....</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 2 Zkušební síly a rozměry zkušebního zařízení [13].....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 3 Minimální vzdálenosti bodu měření od okraje zkušebního tělesa [13].....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 4 Vstřikovací podmínky .....</i>	<i>51</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

PI CD-ROM obsahující plný text práce