

# Měření mechanických vlastností vybraných typů polykarbonátu

Lukáš Krejčířek

---

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: **Lukáš Krejčírek**

Osobní číslo: **T11261**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření mechanických vlastností vybraných typů polykarbonátu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii 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 vedoucího BP.**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. David Maňas, 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: Krejcarěk Lukáš.....

Obor: TŽ.....

## 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 užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 14.5.2014.....

.....  


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

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

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

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

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či 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 přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá měřením a porovnáním mechanických vlastností polykarbonátu. Vybrané typy polykarbonátu jsou Calibre, Makrolon 2207, Nirion a Makrolon R30. Teoretická část se zabývá popisem, vlastnostmi a strukturou polymerních materiálů. Dále popisem druhů zkoušek mechanických vlastností. V praktické části je uvedeno měření mechanických vlastností, porovnání výsledků a jejich zhodnocení.

Klíčová slova: polymer, polykarbonát, mechanické vlastnosti, mechanické zkoušky

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with measurement and comparing of mechanical properties of polycarbonate. Selected types of polycarbonate are Calibre, Makrolon 2207, Nirion and Makrolon R30. Theoretical part deals with description, properties and structure of polymer materials. Also description of types of the tests for mechanical properties. In practical part is indicated measurement of mechanical properties, comparison of results and their evaluation.

Keywords: polymer, polycarbonate, mechanical properties, mechanical tests

Poděkování:

Děkuji vedoucímu panu doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. za odborný pohled a vedení při vypracování této bakalářské práce.

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

Ve Zlíně.....

.....

Lukáš Krejčířek

# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....   | <b>11</b> |
| <b>1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI</b> .....   | <b>12</b> |
| 1.1 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ .....                                    | 12        |
| 1.2 ZKOUŠKA TAHEM .....  | 13        |
| 1.2.1 Trhací stroje .....  | 13        |
| 1.2.2 Zkušební tělesa.....   | 14        |
| 1.2.3 Vyhodnocení tahové zkoušky .....                                       | 14        |
| 1.3 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....  | 16        |
| 1.3.1 Zkoušky tvrdosti plastů .....  | 16        |
| 1.3.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella .....                                  | 17        |
| 1.3.2.1 Princip zkoušky.....   | 17        |
| 1.3.2.2 Postup zkoušky .....   | 18        |
| 1.3.2.3 Vyhodnocení zkoušky.....   | 19        |
| 1.3.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....                                  | 20        |
| 1.3.3.1 Princip zkoušky.....   | 20        |
| 1.3.3.2 Postup zkoušky .....   | 22        |
| 1.3.3.3 Vyhodnocení zkoušky.....   | 22        |
| 1.3.3.4 Přehled stupnic tvrdosti dle Rockwella a odpovídající zatížení ..... | 23        |
| 1.3.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....                                   | 24        |
| 1.3.4.1 Princip zkoušky.....   | 24        |
| 1.3.4.2 Postup zkoušky .....   | 26        |
| 1.3.4.3 Vyhodnocení zkoušky.....   | 26        |
| 1.3.5 Zkouška tvrdosti metodou Shore .....                                   | 27        |
| 1.3.5.1 Princip zkoušky.....   | 27        |
| 1.3.5.2 Postup zkoušky .....   | 28        |
| 1.3.5.3 Vyhodnocení zkoušky.....   | 29        |
| 1.3.6 Zkouška tvrdosti metodou IRHD .....                                    | 29        |
| 1.3.6.1 Princip a popis zkoušky .....  | 29        |
| 1.4 ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....                                       | 30        |
| 1.4.1 Vrubová a rázová houževnatost .....                                    | 30        |
| 1.4.2 Charpyho metoda .....  | 31        |
| 1.4.2.1 Postup při Charpyho metodě.....                                      | 31        |
| 1.4.2.2 Vyhodnocení zkoušky.....   | 32        |
| <b>2 POLYMERNÍ MATERIÁLY</b> .....   | <b>34</b> |
| 2.1 STRUKTURA POLYMERŮ .....   | 34        |
| 2.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ .....   | 34        |
| 2.2.1 Rozdělení polymerů podle tvaru makromolekulárního řetězce .....        | 35        |
| 2.2.2 Rozdělení podle použití.....   | 37        |
| 2.3 POLYKARBONÁT.....  | 38        |
| 2.3.1 Využití polykarbonátu.....   | 39        |
| <b>3 VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ</b> .....  | <b>40</b> |



|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.1       | VSTŘIKOVACÍ STROJE.....   | 40        |
| 3.2       | VSTŘIKOVACÍ FORMA.....  | 41        |
| <b>II</b> | <b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>   | <b>43</b> |
| <b>4</b>  | <b>CÍL PRÁCE .....</b>  | <b>44</b> |
| <b>5</b>  | <b>POPIS ZADANÝCH DRUHŮ POLYKARBONÁTU .....</b>                           | <b>45</b> |
| 5.1       | POLYKARBONÁT CALIBRE.....   | 45        |
| 5.2       | POLYKARBONÁT MAKROLON 2207 .....  | 46        |
| 5.3       | POLYKARBONÁT NIRION .....   | 49        |
| 5.4       | POLYKARBONÁT MAKROLON R30 .....   | 50        |
| 5.5       | VZHLEDOVÉ POROVNÁNÍ VÝROBKŮ Z UVEDENÝCH TYPŮ POLYKARBONÁTU .....          | 50        |
| 5.6       | VSTŘIKOVACÍ PODMÍNKY .....  | 51        |
| <b>6</b>  | <b>ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....</b>                                  | <b>52</b> |
| 6.1       | TAHOVÁ ZKOUŠKA .....  | 53        |
| 6.1.1     | Naměřené hodnoty tahové zkoušky a jejich vyhodnocení .....                | 54        |
| 6.1.1.1   | Porovnání meze pevnosti v tahu .....                                      | 54        |
| 6.1.1.2   | Porovnání modulu pružnosti v tahu .....                                   | 54        |
| 6.1.1.3   | Porovnání poměrného prodloužení .....                                     | 55        |
| 6.2       | ZKOUŠKA TVRDOSTI TYPU SHORE D .....                                       | 55        |
| 6.2.1     | Naměřené hodnoty tvrdosti metodou Shore D a jejich vyhodnocení .....      | 56        |
| 6.2.1.1   | Porovnání tvrdosti metodou Shore D.....                                   | 56        |
| 6.3       | ZKOUŠKA TVRDOSTI TYPU IRHD .....  | 57        |
| 6.3.1     | Naměřené hodnoty tvrdosti metodou IRHD a jejich vyhodnocení .....         | 58        |
| 6.3.1.1   | Porovnání tvrdosti metodou IRHD .....                                     | 58        |
| 6.4       | ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY .....                        | 58        |
| 6.4.1     | Naměřené hodnoty zkoušky vrubové houževnatosti a jejich vyhodnocení ..... | 60        |
| 6.4.1.1   | Porovnání síly potřebné k přeražení vzorku .....                          | 60        |
| 6.4.1.2   | Porovnání vrubové houževnatosti.....                                      | 60        |
|           | <b>ZÁVĚR .....</b>  | <b>62</b> |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>                                     | <b>63</b> |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>                           | <b>66</b> |
|           | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>   | <b>68</b> |
|           | <b>SEZNAM TABULEK.....</b>  | <b>70</b> |

## ÚVOD

Úkolem bakalářské práce je vyhodnocení mechanických vlastností polykarbonátu. Mechanickými vlastnostmi je posouzeno chování materiálu při působení vnějších sil na daný materiál. Měření mechanických vlastností materiálů je nutné provádět například při nákupu, výrobě a vývoji materiálu. Na základě výsledků můžeme lépe určit vhodné využití materiálu v technické praxi. Vhodný výběr materiálu má dopad zejména na celkovou cenu výrobku. Vhodným výběrem materiálu lze získat například hospodárnost, náhradu zavedených materiálů novými, lepší zpracovatelnost, nižší hmotnost a menší odpad.

Mechanické vlastnosti materiálů se měří pomocí mechanických zkoušek. Jednotlivé mechanické zkoušky musí být prováděny při stejných zkušebních podmínkách a postupech, abychom je mohli vzájemně porovnávat. Zejména z těchto důvodů jsou mechanické zkoušky normalizovány. Všechny potřebné údaje o mechanických zkouškách plastů jsou uvedeny v normě ČSN 64 XXXX – sada.

Konečným cílem této bakalářské práce je zhodnocení naměřených hodnot pro vybrané typy polykarbonátu.

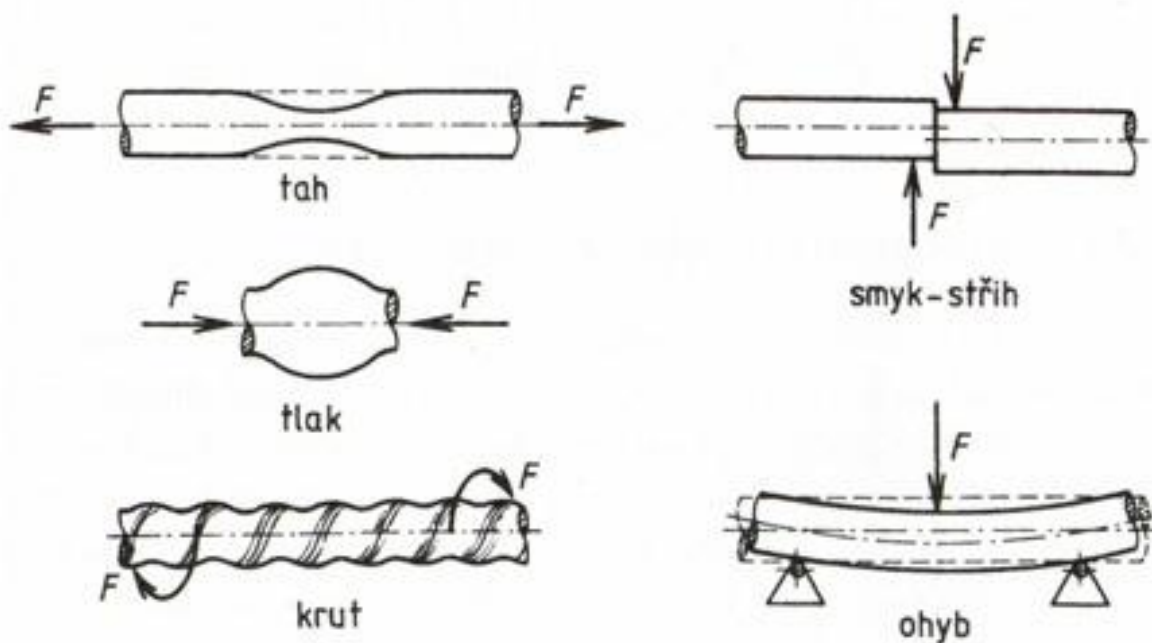
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Znalost mechanických vlastností materiálů je základní parametr, na kterém závisí správné navržení materiálu výrobku. Jsou nutné pro pevnostní výpočty navrhovaných a kontrolovaných strojních dílů a konstrukcí. [1]

Mechanickými vlastnostmi se posuzuje chování materiálu, kdy na materiál působí vnější síly. Použitý materiál je od těchto sil namáhán. Mezi základní druhy namáhání patří tah, tlak, ohyb, stříh a krut. V praxi se často vyskytují případy, kdy působí více těchto namáhání na materiál současně. Potom se jedná o kombinované namáhání. Aby výrobek dlouho spolehlivě sloužil, musí vystavenému namáhání odolávat. [1]

Základní mechanické vlastnosti jsou pevnost, pružnost, houževnatost, plasticita, tvrdost. Jde tedy o soubor vlastností materiálů, podle kterých konstruktér zvolí materiál výrobku. Na mechanické vlastnosti má dopad také okolní prostředí, zejména teplota. [1]



Obr. 1. Nejčastější druhy namáhání materiálu [1]

### 1.1 Zkoušky mechanických vlastností

Tyto zkoušky používáme pro zjišťování mechanických vlastností materiálů. Většina zkoušek je normalizována. Dělí se podle působení sil na zkušební tělesa na statické a dynamické. U statických zkoušek se zatížení zkušební tělesa provádí postupně. U dynamických zkoušek je zkušební těleso zatíženo nárazově. [1]

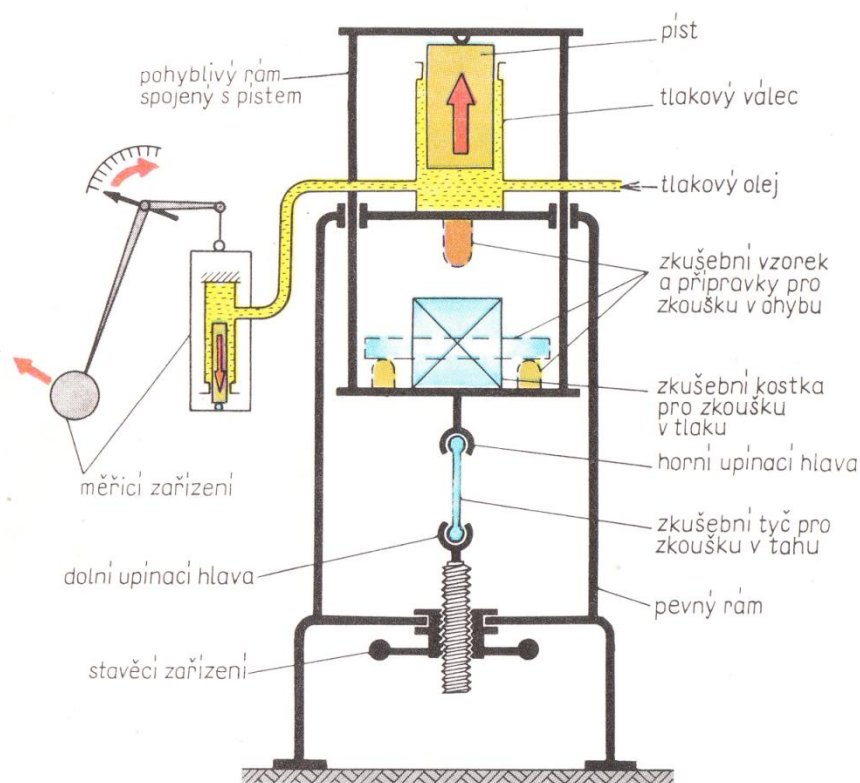
Vzhledem k velké obsáhlosti zde budou popsány pouze zkoušky, které se budou týkat praktické části.

## 1.2 Zkouška tahem

Jedná se o nejčastější statickou zkoušku, pomocí které získáme pevnostní vlastnosti materiálu. Během této zkoušky se zkušební těleso zatěžuje vzrůstající silou pozvolna, klidně a bez rázů až do bodu, kdy dojde k přetržení. Během zkoušky je v zatíženém vzorku jednoosé napětí. Provádí se na trhacích strojích. Veškeré pozorované makroskopické deformační vlastnosti plastů vznikají v důsledku jejich molekulární a nadmolekulární struktury a jejich změn v průběhu silového zatížení. [1, 2]

### 1.2.1 Trhací stroje

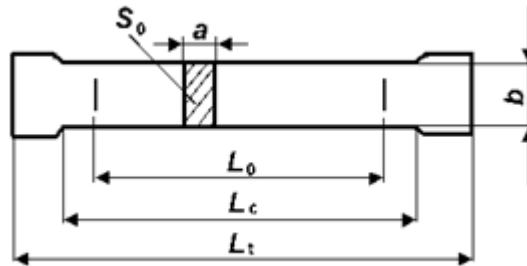
Trhací stroj má tyto základní části: rám, zatěžovací a upínací soustavu, měřící zařízení. Moderní trhací stroje mají elektronické systémy, které snímají velikost působící síly a prodloužení zkušebního tělesa. Software po provedení zkoušky vyhodnotí všechny potřebné výsledky. [1]



Obr. 2. Univerzální zkušební stroj [1]

### 1.2.2 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa z polymerů mají tvar oboustranné lopatky, popřípadě pásku. Jejich tvar udává příslušná norma. Dají se připravit dvěma způsoby. Buď ze zkušebního materiálu vulkanizací, lisováním, nebo vytvrzováním ve formách. Nebo z hotových výrobků či polotovarů, ze kterých se vyřezávají nebo vysekávají. [3, 4]



Obr. 3. Tvar zkušebního tělesa [5]

### 1.2.3 Vyhodnocení tahové zkoušky

Trhací stroj zaznamenává v průběhu zkoušky závislost síly na deformaci zkušebního tělesa. Tahovou zkouškou vyhodnocujeme základní vlastnosti materiálu. Jde o mez pevnosti v tahu, mez kluzu v tahu, tažnost a zúžení (kontrakci). [1]

Mez pevnosti v tahu:

$$\sigma_{PT} = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (1)$$

Příčemž:  $\sigma_{PT}$  je mez pevnosti v tahu [MPa]

$F_{max}$  je síla na mezi pevnosti [N]

$S_0$  je průřez zkušebního tělesa před zkouškou [mm<sup>2</sup>]

Mez kluzu v tahu:

$$\sigma_Y = \frac{F_K}{S_0} \quad (2)$$

Příčemž:  $\sigma_Y$  je mez kluzu v tahu [MPa]

$F_K$  je síla na mezi kluzu [N]

$S_0$  je průřez zkušebního tělesa před zkouškou [mm<sup>2</sup>]

Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (3)$$

Příčemž:  $\varepsilon$  je poměrné prodloužení [%]

$l$  je délka zkušebního tělesa po zkoušce [mm]

$l_0$  je délka zkušebního tělesa před zkouškou [mm]

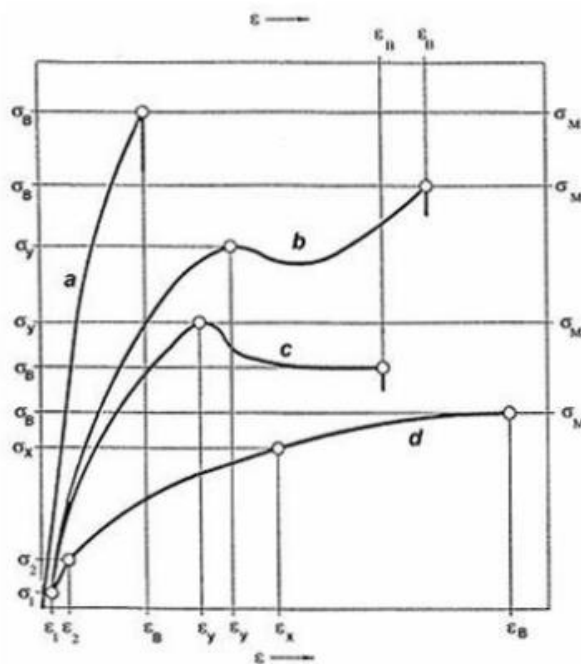
Zúžení:

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 \quad (4)$$

Příčemž:  $Z$  je zúžení průřezu [%]

$S_0$  je průřez zkušebního tělesa před zkouškou [mm<sup>2</sup>]

$S$  je průřez zkušebního tělesa po zkoušce [mm<sup>2</sup>]



Obr. 4. Tahové diagramy polymerů [6]

Křivka a je pro křehké materiály, křivka b a c pro houževnaté materiály s mezí kluzu a křivka d je pro houževnaté materiály bez meze kluzu. [6]

### 1.3 Zkoušky tvrdosti

Tvrdot je jedna z mechanických vlastností. Většina zkoušek tvrdosti patří mezi statické zkoušky. Zkoušky tvrdosti se provádí na zkušebních vzorcích, nebo na hotových výrobcích. Zkoušky tvrdosti se provádějí vtlačováním tvrdých hrotů do zkušebního tělesa dle přesně stanovených podmínek. [1]

Tvrdot je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Na základě této definice jsou většinou založeny přístroje, kterými se tvrdost měří. Provádí se velké množství zkoušek tvrdosti. Zkoušky tvrdosti se rozdělují na vrypové, odrazové a vnikací. [1, 7]

Vrypové zkoušky jsou založeny na měření velikosti vrypu, který je vytvořen přitlačováním diamantovým hrotem určitého tvaru do leštěného povrchu. Představitelem vrypové zkoušky je zkouška Martensova. [1, 7]

Odrazové zkoušky jsou založeny na zjištění odrazu závaží definovaného tvaru a hmotnosti, které dopadá z určité výšky na zkoušený materiál. Jedná se o Shoreho zkoušku. [1, 7]

Vnikací zkoušky jsou nejpoužívanější. Do zkoušeného materiálu se vtlačuje velmi tvrdé těleso. Vyhodnocuje se rozměr a tvar vtisku, na jehož základě se stanovuje hodnota tvrdosti. Používá se zkouška Brinellova, Rockwellova a Vickersova. [1, 7]

#### 1.3.1 Zkoušky tvrdosti plastů

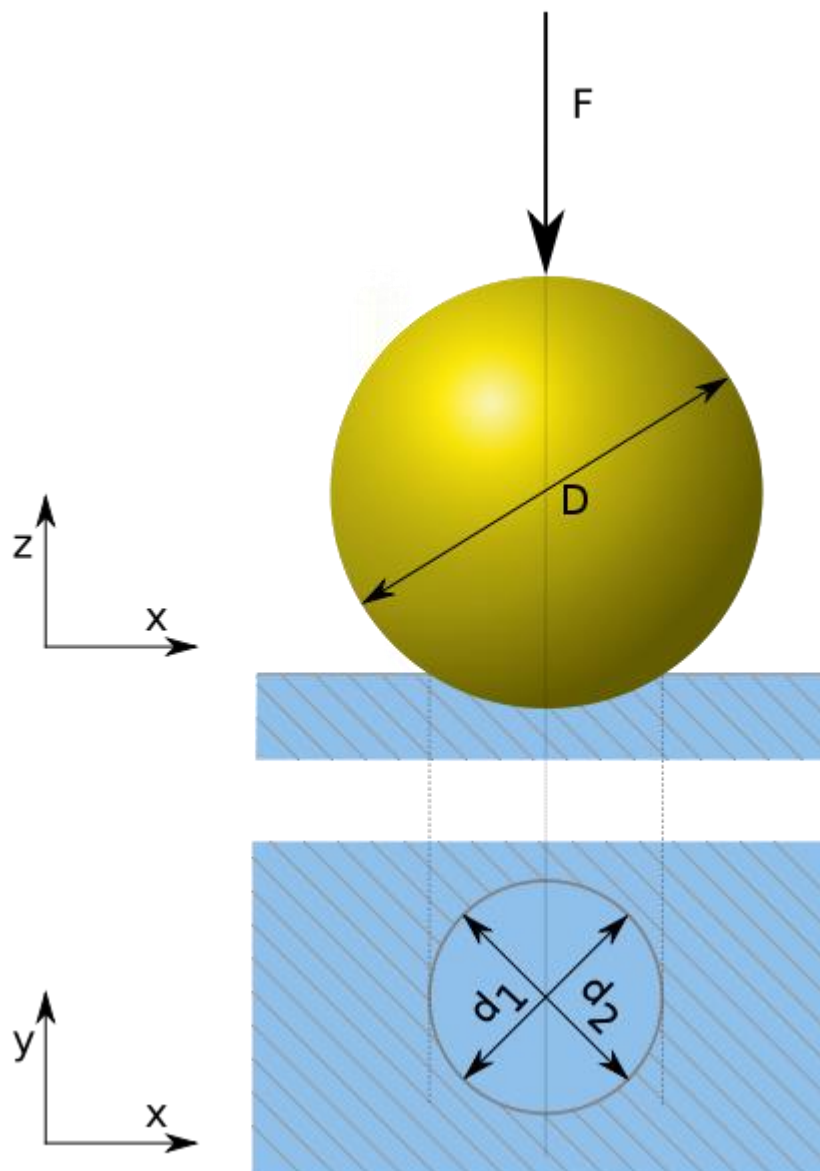
Jelikož plasty jsou převážně houževnaté materiály a jejich povrch se vtlačováním deformuje, vyvinuly se tyto zkoušky v měření odporu celého objemu proti vtlačování hrotu. Tvrdot je tedy vyjádřením tuhosti plastů. Protože polymery mají viskoelastické chování, nelze měřit stopu po vpichu tvrdoměru, ale zjišťuje se rovnovážná hloubka vniknutí hrotu při určité konstantní síle vtlačování. Tvrdot polymerů se může velmi ovlivnit teplotou, navlhnutím, či stupněm krystalinity. Kvůli těmto důvodům se provádí kondicionování. Kondicionováním se provádí úprava vlhkosti zkušebního materiálu na vlhkost, která se nejčastěji vyskytuje ve zkoušeném materiálu. V praxi se provádí kondicionace uložením zkušebního materiálu v prostředí o určité relativní vlhkosti, teplotě a po určitou dobu. [8, 9]



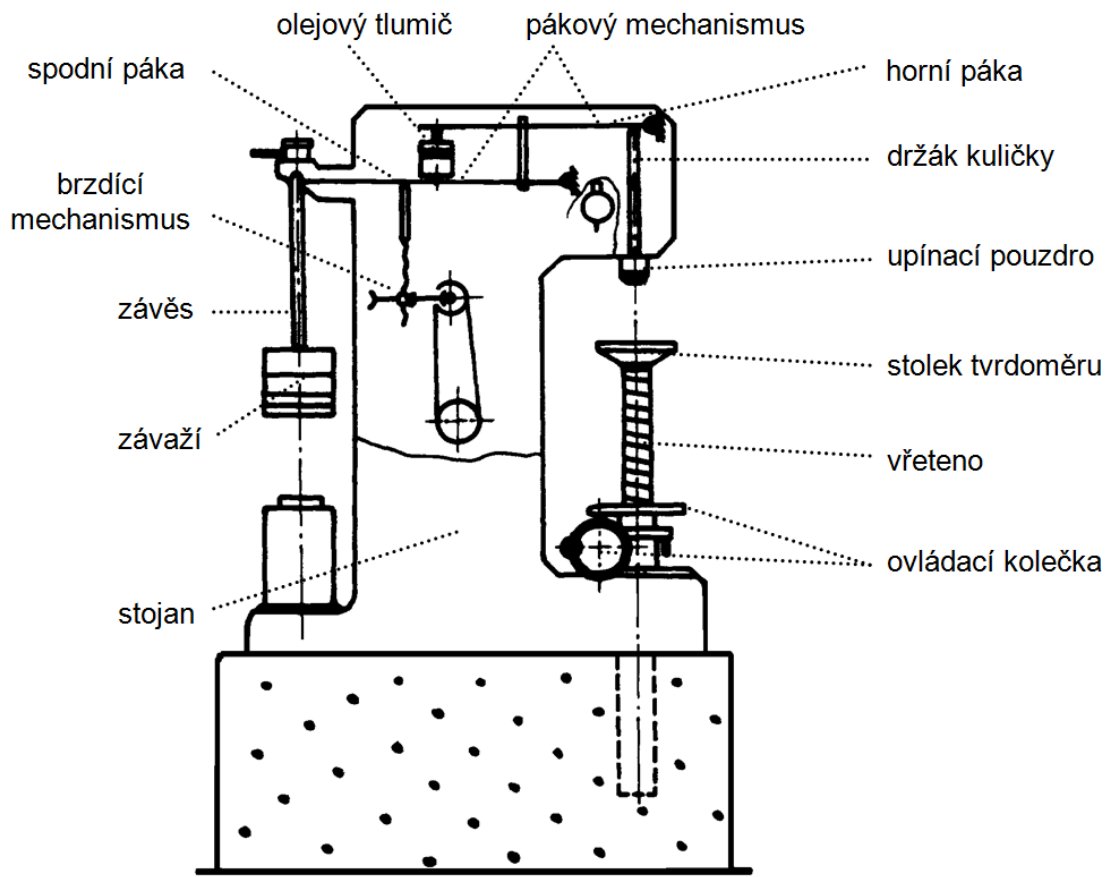
### 1.3.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella

#### 1.3.2.1 Princip zkoušky

Tato metoda spočívá ve vtláčování ocelové kalené kuličky o určitém průměru rovnoměrně určitou, stupňovitou silou po určitou dobu do lesklé rovné plochy zkušebního tělesa nebo součásti. Pro polymerní materiály byla zkouška oproti kovům upravena tak, že používáme větší průměry kuliček a menší sílu při vtláčování kuličky. Zkouška se provádí na Brinellově tvrdoměru [1, 8]



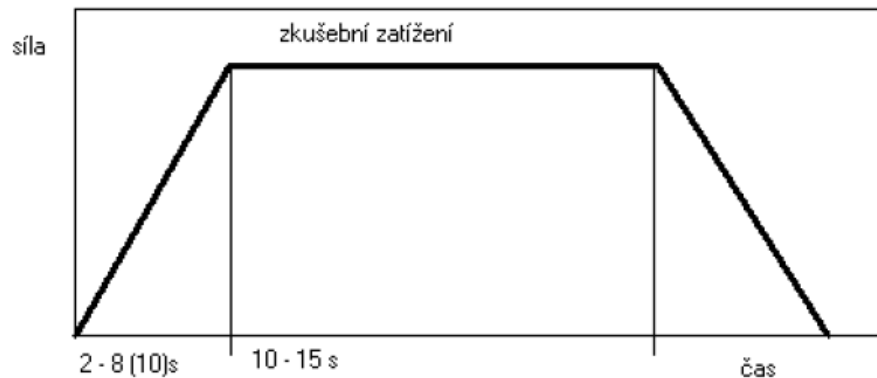
Obr. 5. Princip zkoušky dle Brinella [10]



Obr. 6. Schéma přístroje k měření tvrdosti podle Brinella [11]

### 1.3.2.2 Postup zkoušky

Zkouška se provádí při teplotě okolí  $10 \div 35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zatížení se vybírá tak, aby odpovídalo zkoušenému materiálu a velikosti kuličky. Zatížení musí být vybráno tak, aby velikost průměru vtisku  $d$  byla v rozmezí  $0,24 \div 0,6 D$ . Zkoušené těleso, nebo vzorek musí být na tuhé podložce a mít čistý povrch. Zároveň musí být zajištěno, aby se zkoušený povrch při zkoušce nepohnul. Vnikající těleso vtlačujeme do povrchu zkoušeného tělesa zatížením, které je kolmé k jeho povrchu bez chvění a rázů. Vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být nejméně 2,5 násobek průměru vtisku pro ocel, litinu a nejméně 3 násobek pro lehké kovy, olovo, cín. Vzdálenosti středů dvou vtisků, které jsou vedle sebe, musí být nejméně 4 násobek průměru vtisku pro ocel, litinu a nejméně 6 násobek pro lehké kovy, olovo, cín. [11, 12]



Obr. 7. Průběh zkušebního zatížení pro metodu dle Brinella [12]

### 1.3.2.3 Vyhodnocení zkoušky

Kulička po vtažení do zkoušeného materiálu vytvoří vtisk. Výsledná tvrdost se určí dle průměru vtisku kuličky. Kvůli přesnosti měříme průměr vtisku dvakrát – kolmo na sebe a vypočteme aritmetický průměr. V praxi se používají tabulky, ve kterých najdeme podle velikosti vtisku kuličky a použité síly odpovídající tvrdost. Označení této zkoušky je HB (Brinell hardness). Celé označení se skládá z údajů podmínek zkoušky. Tedy průměru kuličky  $D$ , síly působící na kuličku  $F$  a doby zatížení  $t$ . Tyto údaje od sebe oddělujeme zlomkovou čarou. Příklad označení:  $HB\ 5/7500/30 = 320$  [1, 13]

Určení tvrdosti HB dle velikosti vtisku je podle vzorce:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (5)$$

Přičemž: HB je hodnota tvrdosti podle Brinella

$F$  je síla působící na těleso [N]

$D$  je průměr kuličky [mm]

$d$  je průměr vtisku od kuličky [mm]

$\pi$  je Ludolfovo číslo

Určení tvrdosti HB dle hloubky důlku je podle vzorce:

$$HB = \frac{F_r}{\pi \cdot D \cdot h_r} \quad (6)$$

Kde:

$$F_r = F \cdot \frac{\alpha}{(h - h_r) + \alpha} \quad (7)$$

Kde:

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} \quad (8)$$

Příčemž:  $F_r$  je redukované zkušební zatížení [N]

$h$  je hloubka vtisku [mm]

$D$  je průměr kuličky [mm]

$\pi$  je Ludolfovo číslo

$F$  je síla působící na těleso [N]

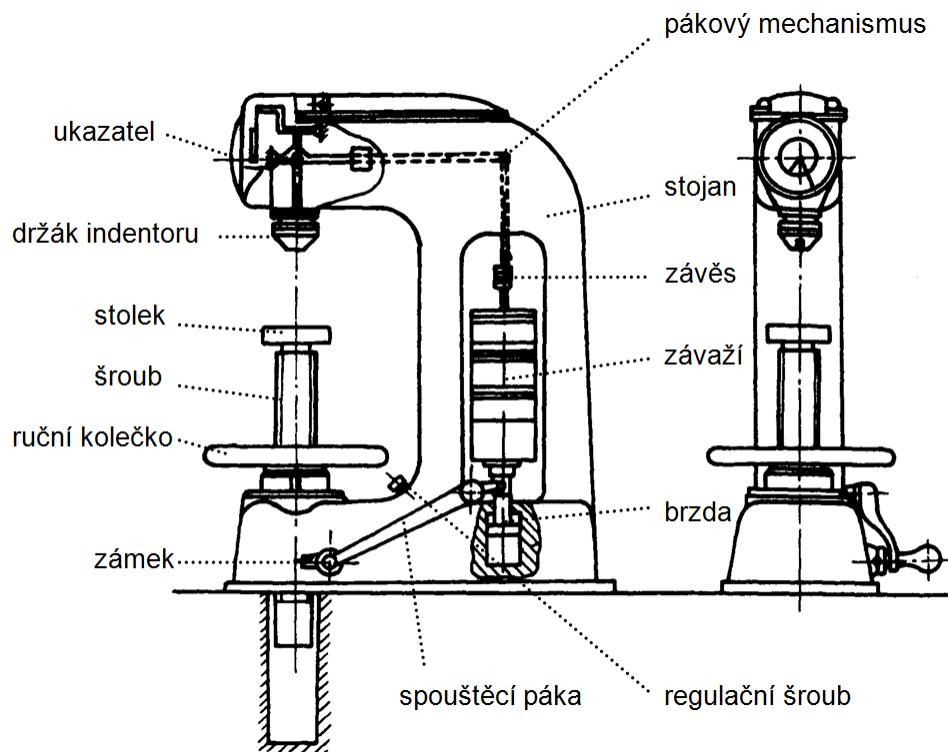
$h_r$  je redukovaná hloubka vtlačení kuličky, která má hodnotu 0,25 mm

$\alpha$  je konstanta, která má hodnotu 0,21 [14]

### 1.3.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

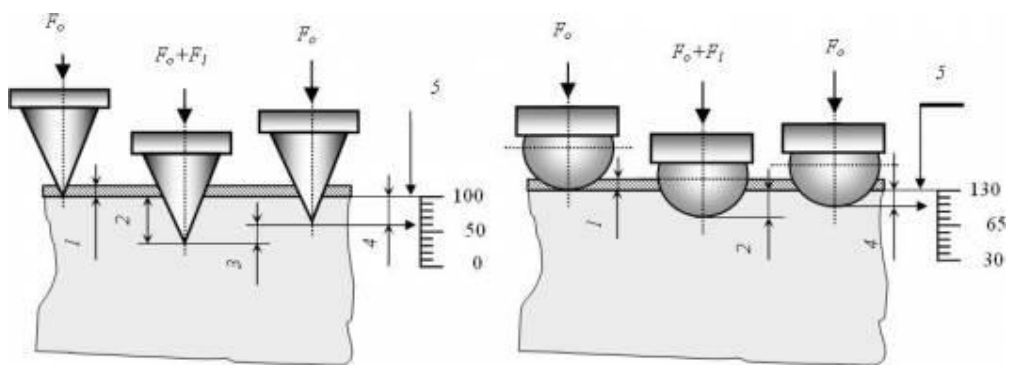
#### 1.3.3.1 Princip zkoušky

Tato metoda měření tvrdosti se zjišťuje na Rockwellově tvrdoměru. Principem je vtlačování zkušebního tělesa do zkušebního materiálu. Měří se rozdíl hloubky trvalého vtisku  $h$  ocelové kuličky nebo diamantového kužele mezi předběžným zatížením  $F_0$  a celkovým zatížením  $F$  (na obrázku 9 znázorňuje hloubku trvalého vtisku kóta číslo 4.). Celkové zatížení  $F$  je dáno součtem předběžného zatížení  $F_0$  a přídavným zatížením  $F_1$ . Princip zatěžování je uveden na obrázku 10. Důvod předběžného zatížení je odstranit z měření hloubky nepřesnosti povrchu. [1, 13, 14]



Obr. 8. Schéma přístroje na měření tvrdosti dle Rockwella [15]

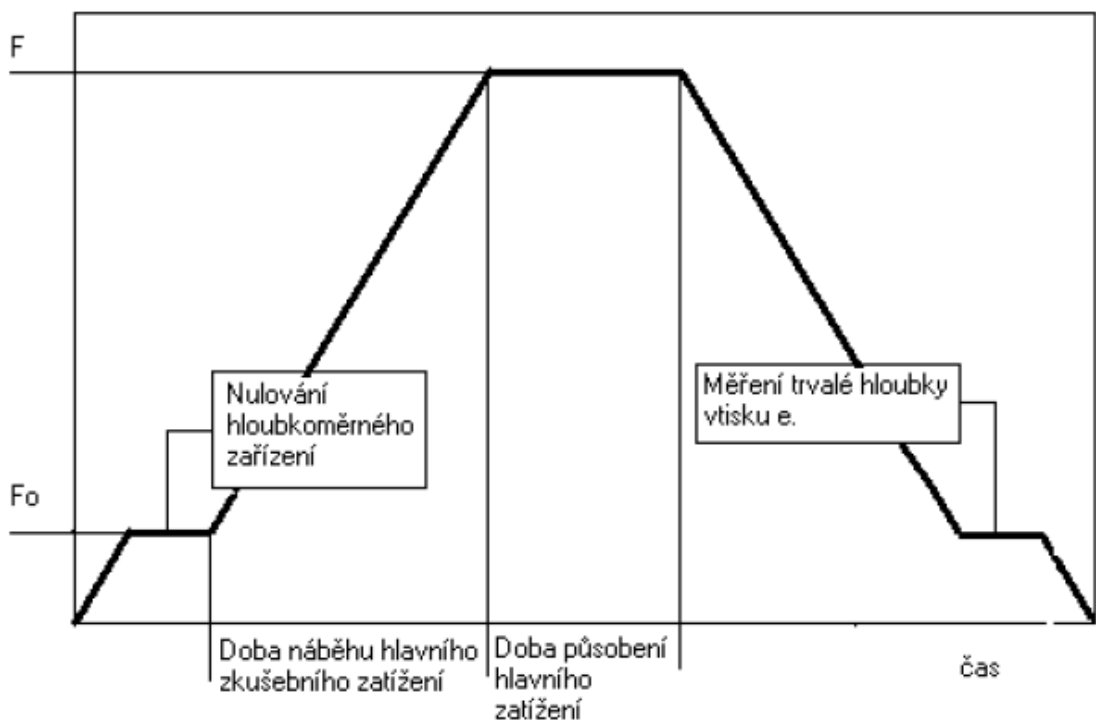
Na obrázku 9 představuje kóta číslo 1 hloubku vtlačení způsobenou předběžným zatížením  $F_0$ , kóta číslo 2 hloubku vtlačení způsobenou celkovým zatížením, kóta číslo 3 elastickou část hloubky vtlačení způsobenou celkovým zatížením, kóta číslo 5 základní rovinu měření (vzdálenost od povrchu způsobená vtlačení předběžného zatížení). Jeden dílek na Rockwellově stupnici tvrdosti je svislý posuv zkušebního tělesa o 0,002 mm. Maximální velikost vtisku je 0,2 mm. Zkouška je rychlá, snadná a zanechává velmi malé stopy. Je vhodná pro běžnou kontrolu velkých sérií výrobků. [1, 14]



Obr. 9. Princip zkoušky dle Rockwella [16]

### 1.3.3.2 Postup zkoušky

Zkouška se provádí při teplotě okolí  $10 \div 35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zkoušené těleso nebo vzorek musí být na tuhé podložce a musí být podepřeno tak, že zkoušený povrch je v rovině kolmé k ose vnikajícího tělesa a ke směru zatížení. Zároveň musí být zajištěno, aby se zkoušený povrch při zkoušce nepohnul. Zkoušený povrch se přivede do kontaktu s vnikajícím tělesem. Po dotknutí se zkoušený povrch zatíží předběžným zatížením  $F_0$  bez rázů, chvění a kmitů po dobu  $2 \div 8 \text{ s}$ . Po této době se předběžné zatížení zvýší o přídavné zatížení na celkové zatížení. Celkové zatížení trvá  $2 \div 6 \text{ s}$ . Přídavné zatížení se odlehčí a zůstane jen předběžné zatížení  $F_0$ . Po celou dobu trvání zkoušky musí být přístroj ochráněn proti rázům a chvěním. Vzdálenost bodů středů vtisků musí být nejméně 2,5 násobek průměru vtisku, ale nejméně 1 mm. Vzdálenost bodů středů dvou sousedních vtisků musí být 4 násobek průměru vtisku, ale nejméně 2 mm. Hodnota tvrdosti dle Rockwella se většinou odečítá přímo z měřicího zařízení. [12, 15]



Obr. 10. Průběh zkušebního zatížení pro Rockwellovu metodu [12]

### 1.3.3.3 Vyhodnocení zkoušky

Zkouška se označuje HR (Rockwell hardness). Po zjištění velikosti trvalého vtisku  $h$  lze výslednou tvrdost vypočítat pomocí vzorce:

$$HR = 100 - \frac{h}{S} \quad (9)$$

Příčemž: HR je hodnota tvrdosti podle Rockwella

h je velikost trvalého vtisku [mm]

S je jeden dílek na Rockwellově stupnici,  $S = 0,002$  [mm]

Tento vztah je pro stupnice A a C.

Pro stupnici B je vzorec:

$$HR = 130 - \frac{h}{S} \quad (10)$$

Příčemž: HR je hodnota tvrdosti podle Rockwella

h je velikost trvalého vtisku [mm]

S je jeden dílek na Rockwellově stupnici,  $S = 0,002$  [mm]

Příklad označení např. 58 HRC znamená, že tvrdost je 58, metodou podle Rockwella na stupnici C.

#### 1.3.3.4 Přehled stupnic tvrdosti dle Rockwella a odpovídající zatížení

Tab. 1. Stupnice tvrdosti podle Rockwella [15]

| Stupnice tvrdosti | Symbol tvrdosti | Indentor (průměr [mm])   | $F_0$ [N] | $F_1$ [N] | $F$ [N] | Rozsah měření |
|-------------------|-----------------|--------------------------|-----------|-----------|---------|---------------|
| A                 | HRA             | diamantový kužel         | 98,07     | 490,3     | 588,4   | 20 – 88       |
| B                 | HRB             | ocelová kulička (1,5875) | 98,07     | 882,6     | 980,7   | 20 – 100      |
| C                 | HRC             | diamantový kužel         | 98,07     | 1373      | 1471    | 20 – 70       |
| D                 | HRD             | diamantový kužel         | 98,07     | 882,6     | 980,7   | 40 – 77       |
| E                 | HRE             | ocelová kulička (3,175)  | 98,07     | 882,6     | 980,7   | 70 – 100      |
| F                 | HRF             | ocelová kulička          | 98,07     | 490,3     | 588,4   | 60 – 100      |

|      |         |                             |       |       |       |          |
|------|---------|-----------------------------|-------|-------|-------|----------|
|      |         | (1,5875)                    |       |       |       |          |
| G    | HRG     | ocelová kulička<br>(1,5875) | 98,07 | 1373  | 1471  | 30 – 94  |
| H    | HRH     | ocelová kulička<br>(3,175)  | 98,07 | 490,3 | 588,4 | 80 – 100 |
| K    | HRK     | ocelová kulička<br>(3,175)  | 98,07 | 1373  | 1471  | 40 – 100 |
| 15 N | HR 15 N | diamantový kužel            | 29,42 | 117,7 | 147,1 | 70 – 94  |
| 30 N | HR 30 N | diamantový kužel            | 29,42 | 264,8 | 294,2 | 42 – 86  |
| 45 N | HR 45 N | diamantový kužel            | 29,42 | 441,3 | 441,3 | 20 – 77  |
| 15 T | HR 15 T | ocelová kulička<br>(1,5875) | 29,42 | 117,7 | 147,1 | 67 – 93  |
| 30 T | HR 30 T | ocelová kulička<br>(1,5875) | 29,42 | 264,8 | 294,2 | 29 – 82  |
| 45 T | HR 45 T | ocelová kulička<br>(1,5875) | 29,42 | 411,9 | 441,3 | 1 - 72   |

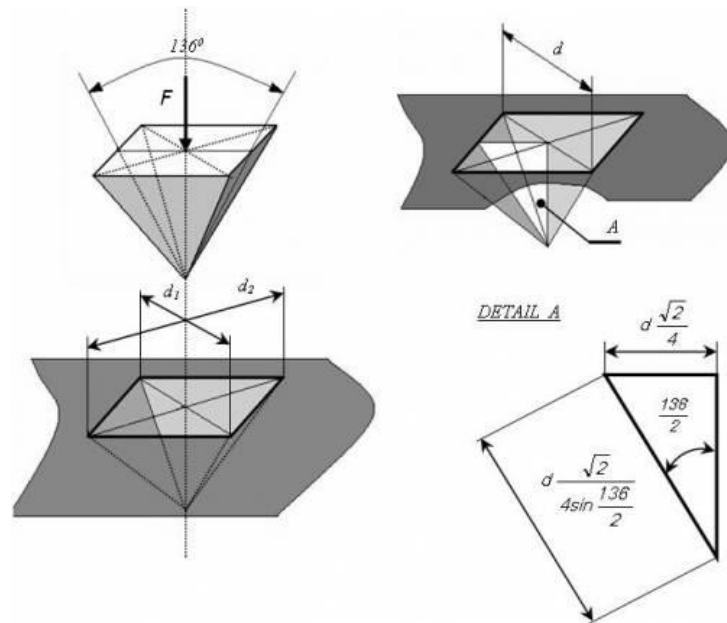
### 1.3.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

#### 1.3.4.1 Princip zkoušky

Zkouška podle Vickerse se provádí podobným způsobem jako zkouška podle Brinella. Do zkoušeného vzorku se vtlačuje pravidelný diamantový jehlan se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Diamantový jehlan vtlačujeme do zkoušeného vzorku zkušebním zatížením  $F$  (od 10 N do 1000 N) po určitou dobu a zjišťujeme úhlopříčku vtisku  $d$ , která je dána aritmetickým průměrem délek obou úhlopříček po odlehčení. Tvrdost podle Vickerse se určuje jako poměr mezi zkušebním zatížením  $k$  ploše vtisku. Zkouška se měří na Vickersově tvrdoměru. [1, 14, 17]

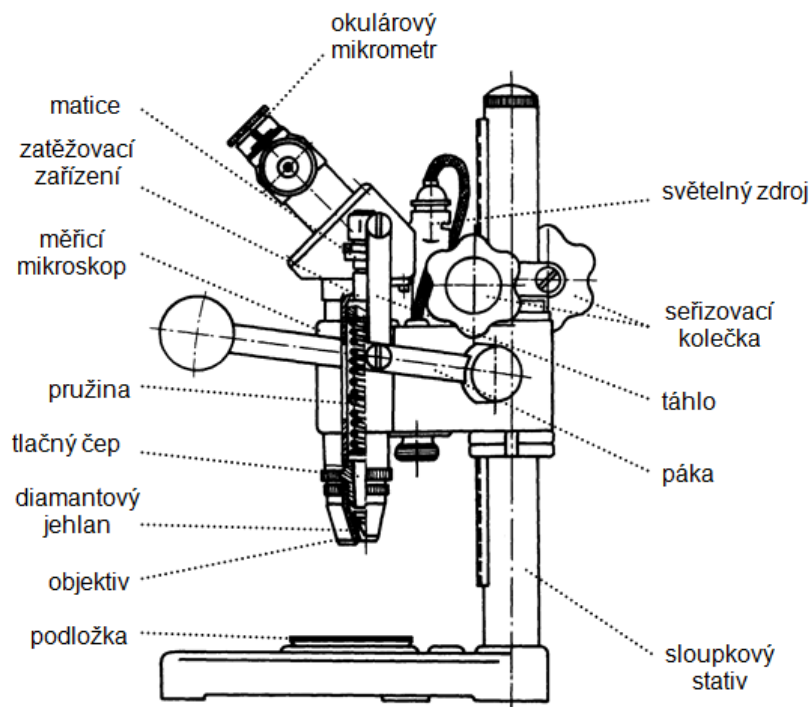


V praxi se často používají tabulky, kde podle zatěžující síly  $F$  a délky úhlopříčky  $d$  zjistíme tvrdost odpovídající těmto hodnotám. [1]



Obr. 11. Princip zkoušky dle Vickerse [18]

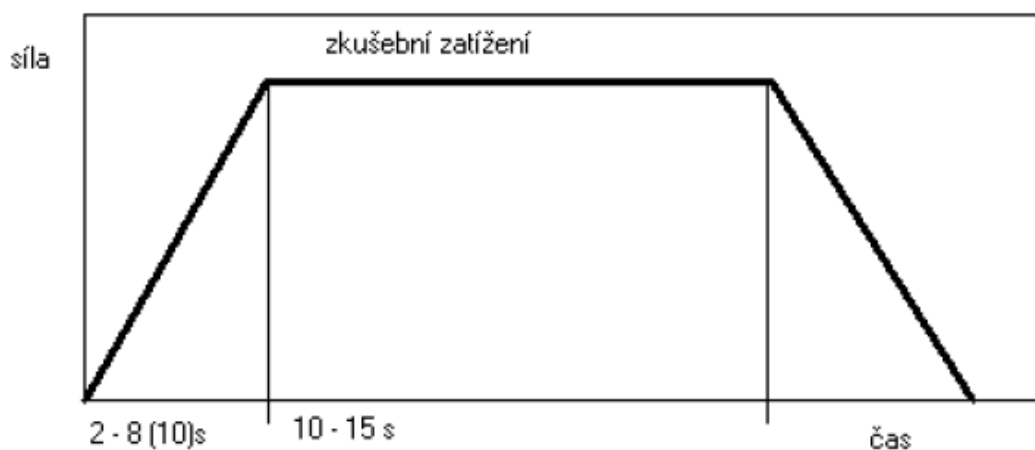
Tato metoda je vhodná pro všechny tvrdosti, je velice přesná a není téměř závislá na zatížení. [1]



Obr. 12. Schéma přístroje na měření tvrdosti dle Vickerse [17]

### 1.3.4.2 Postup zkoušky

Zkouška se provádí při teplotě okolí  $10 \div 35$  °C. Při zkoušce musíme použít předepsané zatížení  $F$ . Zkoušené těleso nebo vzorek musí být na tuhé podložce a musí být zajištěno, aby se zkoušený povrch při zkoušce nepohnul. Vnikající těleso se zatlačuje do zkoušeného vzorku zkušebním zatížením. Zatížení musí směřovat kolmo k povrchu zkoušeného vzorku a to bez chvění a rázů. Styčné plochy musí být čisté. Doba, při které působíme plným zkušebním zatížením, musí být  $10 \div 15$  s. Vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být nejméně 2,5 násobek průměru vtisku pro ocel, litinu a nejméně 3 násobek pro lehké kovy, olovo, cín. Vzdálenosti středů dvou vtisků, které jsou vedle sebe, musí být nejméně 4 násobek průměru vtisku pro ocel, litinu a nejméně 6 násobek pro lehké kovy, olovo, cín. [12, 17]



Obr. 13. Průběh zkušebního zatížení pro Vickersovu metodu [12]

### 1.3.4.3 Vyhodnocení zkoušky

Zkouška se označuje HV (Vickers hardness). Po zjištění velikosti úhlopříčky  $d$  po trvalém vtisku lze výslednou tvrdost vypočítat pomocí vzorce:

$$HV = \frac{1}{g} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \frac{\sin \alpha}{2}}{d^2} \quad (11)$$

Kde:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (12)$$

Příčemž: HV je hodnota tvrdosti podle Vickerse

$g$  je tíhové zrychlení, které je  $9,81 \text{ m/s}^2$

$F$  je síla působící na těleso [N]

$d$  je průměrná velikost úhlopříčky [mm]

$d_1$  je velikost jedné úhlopříčky [mm]

$d_2$  je velikost druhé úhlopříčky [mm]

$\alpha$  je hodnota vrcholového úhlu jehlanu, která je  $136^\circ$  [15]

Příklad označení: 640 HV 1/20 znamená, že tvrdost podle Vickerse je 640 při zkušebním zatížením 1 kg po dobu 20 s.

Zkouška podle Vickerse je rozdělena do tří skupin podle zatížení. Rozdělení uvádí následující tabulka.

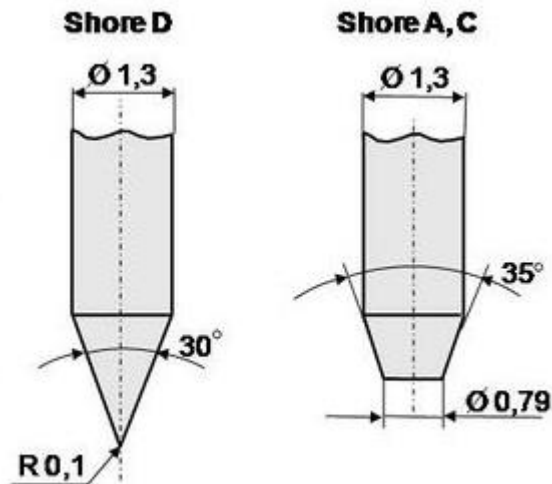
Tab. 2. Druhy měření podle Vickerse [17]

| Označení  | Symbol tvrdosti | Zkušební zatížení F [N] |
|---|-----------------|-------------------------|
| Zkouška tvrdosti podle Vickerse                     | HV 5 ÷ HV 100   | 49,03 ÷ 980,7           |
| Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení | HV 0,2 ÷ < HV 5 | 1,961 ÷ < 49,07         |
| Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse                | < HV 0,2        | < 1,961                 |

### 1.3.5 Zkouška tvrdosti metodou Shore

#### 1.3.5.1 Princip zkoušky

Metoda Shore patří mezi dynamické zkoušky. Principem je vtlačování hrotu do zkušebního tělesa. Odpor zkušebního tělesa proti vnikání hrotu daného typu je zajištěn pružinou. Tvrdost není přímo úměrná vniku ocelového hrotu do zkušebního tělesa a závisí na modulu pružnosti a viskoelastickém stavu zkušebního vzorku. Nejpoužívanější metody jsou typu A a D. Metoda A se používá pro měkčí materiály, metoda D je určena pro tvrdší materiály (pro případy, kdy tvrdost materiálu překročí 85 jednotek na stupnici A). [14, 34]



Obr. 14. Typy hrotů metody Shore [35]

### 1.3.5.2 Postup zkoušky

Při provádění zkoušky se postupuje tak, že zkušební těleso položíme na vodorovnou opěrnou podložku. Přístroj musí být kolmo ke zkušebnímu tělesu, které musí být umístěno tak, aby zkušební hrot od jakéhokoliv okraje byl vzdálen tak, aby umístění neovlivňovalo výsledky. Na zkušební těleso se co nejrychleji a bez rázů přitlačí opěrná patka, která je vedle hrotu. Výsledná tvrdost se odečítá na stupnici po uplynutí určité doby [14, 34]



Obr. 15. Přístroj na měření tvrdosti Shore [36]





Obr. 17. Přístroj na měření tvrdosti IRHD [36]

## 1.4 Zkouška vrubové houževnatosti

Tato zkouška se řadí k nejdůležitějším. Při této zkoušce zjišťujeme, kolik práce či energie se vynaloží na porušení zkušebního tělesa. Většinou se zkouší jedním rázem, při kterém se na porušení zkušebního tělesa použije najednou taková velikost energie, která je k porušení dostatečná. Nejčastější je zkouška rázem v ohybu. Pomocí této zkoušky lze určit houževnatost a křehkost materiálu a určuje velikost citlivosti zkoušeného materiálu vůči místní koncentraci napětí během dynamického namáhání rázem. [1, 2]

### 1.4.1 Vrubová a rázová houževnatost

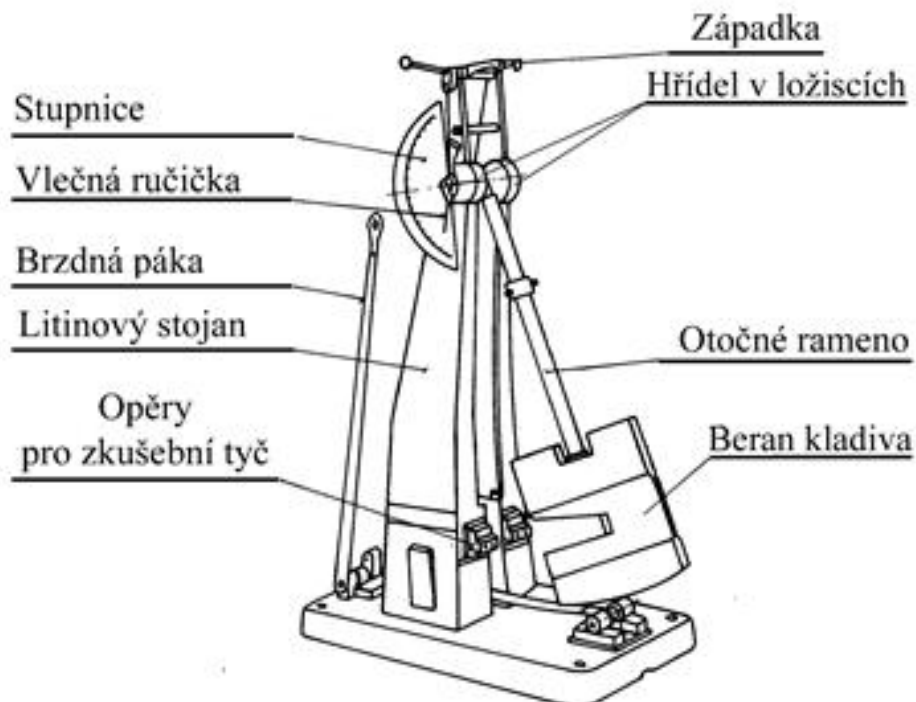
Houževnatost představuje schopnost materiálu odolávat vzniku a šíření trhliny. Čili nám určuje, kolik energie je materiál schopen vydržet, než dojde k jeho porušení. [19]

Rázová houževnatost představuje energii, která se spotřebuje na porušení zkušebního tělesa vztažená na plochu kritického průřezu zkušebního tělesa při předepsaných podmínkách. Označuje se  $A_n$  [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]. [19]

Vrubová houževnatost představuje energii, která se spotřebuje na porušení zkušebního tělesa vztažená na plochu kritického průřezu zkušebního tělesa opatřeného vrubem při předepsaných podmínkách. Označuje se  $A_k$  [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]. [19]

#### 1.4.2 Charpyho metoda

Vrubová a rázová houževnatost se nejčastěji měří Charpyho metodou na Charpyho kyvadlovém kladivu. Těžké kyvadlové kladivo, otočné kolem osy s rozsahem určeným podle typu zkoušeného materiálu je opatřeno stupnicí, na které odečítáme velikost spotřebované práce  $W$  [J]. Vruby na zkušebních tělesech mají různé tvary, které jsou normovány (ČSN EN ISO 179-1). [1,2]

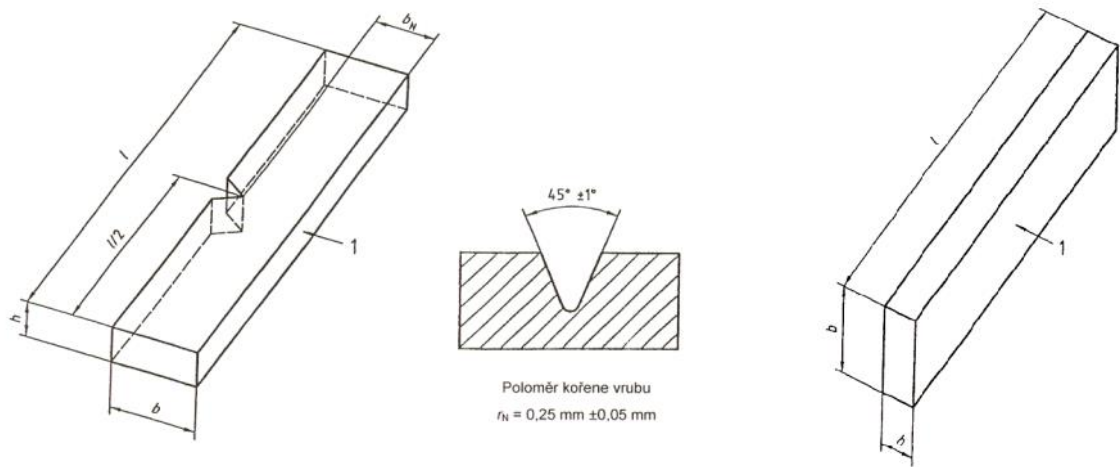


Obr. 18. Charpyho kladivo [20]

##### 1.4.2.1 Postup při Charpyho metodě

Kladivo se zvedne a upevníme ho v počáteční poloze nejčastěji západkou. V nejvyšší poloze kladiva se umístí zkušební těleso, které je upevněno o opěry. Zkušební těleso

je orientováno tak, aby byl vrub při nárazu v tahové oblasti (při nárazu je vrub rozevírán). Uvolníme západku a kladivo necháme volně padat dolů. Po přerušení zkušební tělesa odečteme na stupnici velikost spotřebované práce. Vrub má velký vliv na výsledek zkoušky, vrubová houževnatost je až 10 krát menší než rázová houževnatost. Můžeme srovnávat pouze výsledky, které byly naměřeny na zkušebních tělesech stejných rozměrů a stejném tvaru vrubu. Neexistuje všeobecná metoda, podle které by bylo možné přepočítávat výsledky zjištěné jednou metodou na hodnoty zjištěné jinou metodou. [1, 19, 20]



Obr. 19. Tvar zkušební tělesa pro Charpyho metodu [21]

#### 1.4.2.2 Vyhodnocení zkoušky

Po zjištění spotřebované práce lze určit rázovou a vrubovou houževnatost. Rázová houževnatost (u zkušebních těles bez vrubu) se určí podle vztahu:

$$A_n = \frac{W}{S_0} \quad (13)$$

Kde:

$$S_0 = b \cdot h \quad (14)$$

Přičemž:  $A_n$  je rázová houževnatost  $\left[ \frac{J}{m^2} \right]$

$W$  je spotřebovaná práce [J]

$S_0$  je průřez ve střední části tělesa  $[m^2]$



$b$  je šířka střední části tělesa [m]

$h$  je tloušťka střední části tělesa [m]

Vrubová houževnatost (u zkušebních těles opatřených vrubem) se určí podle vztahu:

$$A_k = \frac{W}{S_0} \quad (15)$$

Kde:

$$S_0 = b_h \cdot h \quad (16)$$

Příčemž:  $A_k$  je vrubová houževnatost  $\left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2}\right]$

$W$  je spotřebovaná práce [J]

$S_0$  je průřez ve střední části tělesa [m<sup>2</sup>]

$b_h$  je šířka střední části tělesa pod vrubem [m]

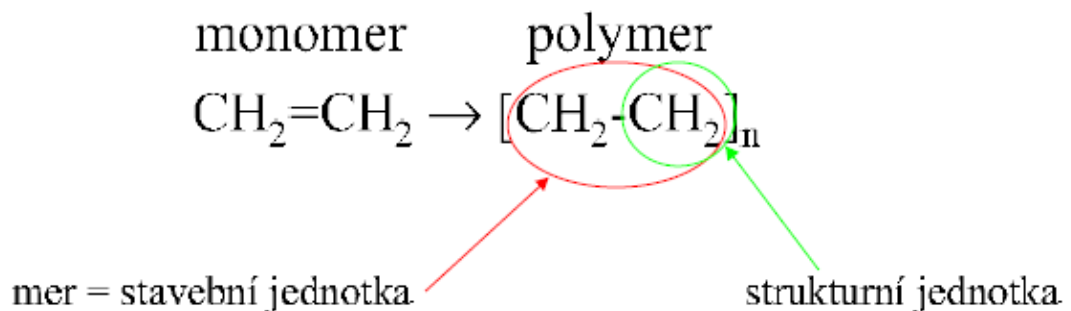
$h$  je tloušťka střední části tělesa [m]

## 2 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymerní materiály představují jednu z nejmladších skupin konstrukčních materiálů. Aktuálně lze na trhu najít několik tisíc druhů polymerů, ovšem v praxi našlo výraznějšího uplatnění pouze několik desítek druhů. Polymerní materiály vykazují specifické vlastnosti. Jsou lehké, nekorodující, vykazují dobré tepelné a elektrické izolační vlastnosti. Různými modifikacemi a příměsemi můžeme podstatně ovlivnit jejich vlastnosti. [1, 22]

### 2.1 Struktura polymerů

Polymery jsou makromolekulární látky, které jsou tvořeny řetězcem makromolekul. Tyto makromolekuly obsahují stovky až tisíce atomů a vzniknou, jestliže jsou primárními kovalentními vazbami spojeny stavební jednotky. Stavební jednotky jsou nízkomolekulární látky – mery, které se stále opakují. V menší míře se plasty vyrábějí i modifikací přírodních makromolekulárních látek (celulóza, přírodní kaučuk), ale z větší části jsou plasty vyráběny synteticky. [1, 23]



Obr. 20. Monomer a polymer

### 2.2 Rozdělení polymerů

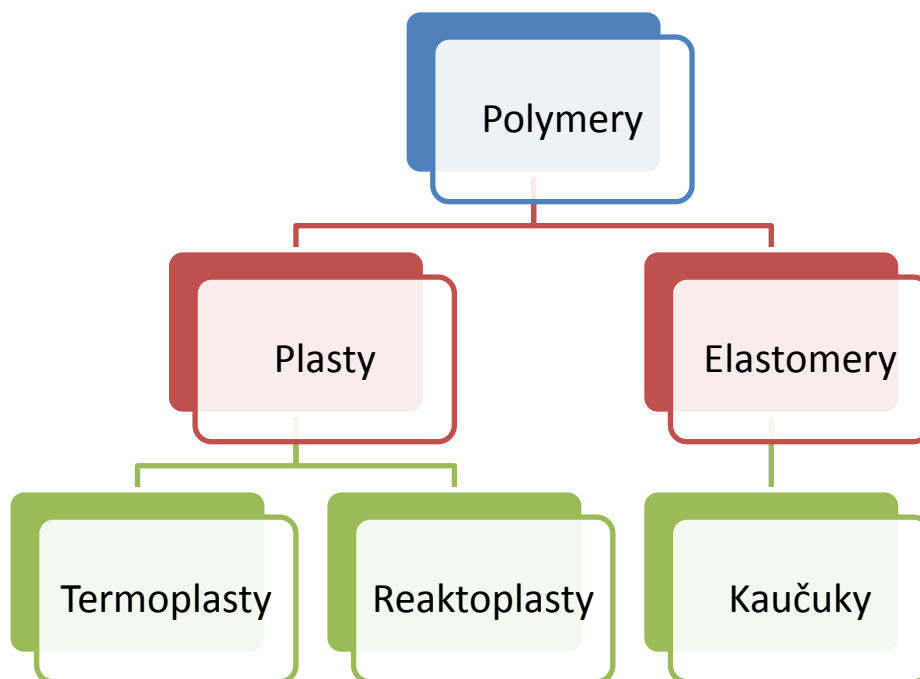
Polymery dělíme na dvě základní skupiny. Jsou to plasty a elastomery. Plasty jsou při běžných podmínkách většinou tvrdé, přičemž často i křehké. Za zvýšené teploty jsou plasty plastické a tvarovatelné. Plasty dále dělíme na termoplasty a reaktoplasty. [1]

Termoplasty jsou polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, ve kterém jsou snadno tvarovatelné a zpracovatelné. Při ochlazení pod teplotu tání (u semikrystalických polymerů), nebo teplotu tečení (u amorfních polymerů) bude polymer v tuhém stavu. Jelikož při zahřívání nedochází ke změně chemické struktury, můžeme termoplast opakovaně tavit. Amorfní polymery mají neuspořádané molekulární řetězce a ne-

obsahují krystaly – jsou průhledné. Amorfní polymery procházejí během zahřívání od dostatečně nízké teploty oblastí sklovitou, kaučukovitou a tečení. Semikrystalické polymery mají pravidelně uspořádané molekulární řetězce, které zaujímají pozici v krystalické mřížce. Semikrystalické polymery procházejí během zahřívání od dostatečně nízké teploty oblastí krystalickou a tání. [3]

Reaktoplasty při zahřívání měknou, přičemž je můžeme tvářet po omezenou dobu, při dalším ohřívání dojde k chemické reakci – prostorovému zesíťování (vytvrzení). Tento děj je nevratný. Vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit. Mezi reaktoplasty patří fenol-formaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice a další. [3]

Elastomery jsou polymerní materiály, které měknou při zahřívání a lze je tvářet, ovšem jen po omezenou dobu. Při dalším ohřívání dojde k chemické reakci - prostorovému zesíťování (vulkanizaci). [3]



Obr. 21. Rozdělení polymerů

### 2.2.1 Rozdělení polymerů podle tvaru makromolekulárního řetězce

Z hlediska uspořádání makromolekul polymerů rozlišujeme čtyři druhy. Jedná se o lineární, rozvětvené, zesíťované a prostorově zesíťované. [3, 22]

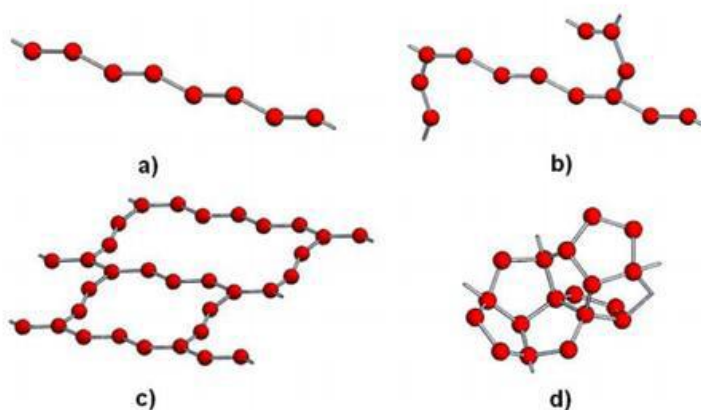
U lineárních makromolekul se monomerní molekuly řadí jedna molekula vedle druhé a můžou se z prostorových důvodů více přiblížit k sobě. Polymer potom má vyšší

hustotu (HDPE). Polymery s lineárními makromolekulami mají většinou dobrou rozpustnost a tavitelnost z důvodu dobré pohyblivosti makromolekul. V tuhém stavu jsou houževnaté. [3, 22]

U rozvětvených makromolekul se na hlavním řetězci vyskytují boční větve, kvůli kterým se rozvětvené makromolekuly nemůžou k sobě více přiblížit. Polymer potom má nižší hustotu (LDPE). Kvůli rozvětvení se zhoršuje pohyblivost makromolekul a tím pádem i tekutost v roztaveném stavu. Boční řetězce, kvůli kterým jsou sousední makromolekuly oddáleny, způsobují pokles mezimolekulárních sil a tím i zhoršení mechanických vlastností. [3, 22]

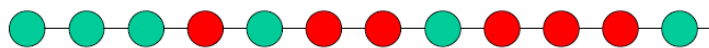
U zesíťovaných makromolekul jsou přímé, nebo rozvětvené řetězce propojeny mezi sebou vazbami, čímž vytvářejí jednu nekonečnou makromolekulu (prostorovou síť). Tato síť způsobuje ztrátu tavitelnosti a rozpustnosti polymeru. Takto zesíťované polymery jsou tvrdé, tuhé a vykazují zvýšenou odolnost proti zvýšené teplotě, ale nízkou odolnost proti namáhání rázem. Vyskytují se řídké sítě (například elastomerní kaučukovité polymery) a husté sítě (například reaktoplasty). [3, 22]

Prostorově zesíťované makromolekuly mají trojrozměrné monomery, které mají tři aktivní kovalentní vazby, které vytvářejí trojrozměrnou síť. Tyto polymery mají dobré mechanické vlastnosti, patří sem například epoxidy a fenolformaldehydy. [3, 22]



Obr. 22. Typy makromolekulárních řetězců: a) lineární, b) rozvětvený, c) zesíťovaný, d) prostorově zesíťovaný [3]

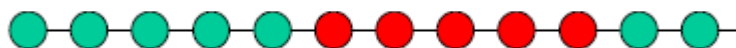
Polymery vzniklé polymerací dvou a více druhů merů se nazývají kopolymery. Podle jejich uspořádání rozlišujeme kopolymery na statické, alternující, blokové, roubované. [23]



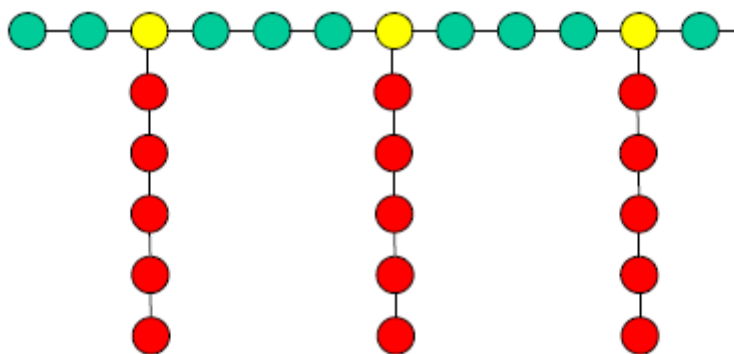
Obr. 23. Statický kopolymer



Obr. 24. Alternující kopolymer



Obr. 25. Blokový kopolymer



Obr. 26. Roubovaný kopolymer

### 2.2.2 Rozdělení podle použití

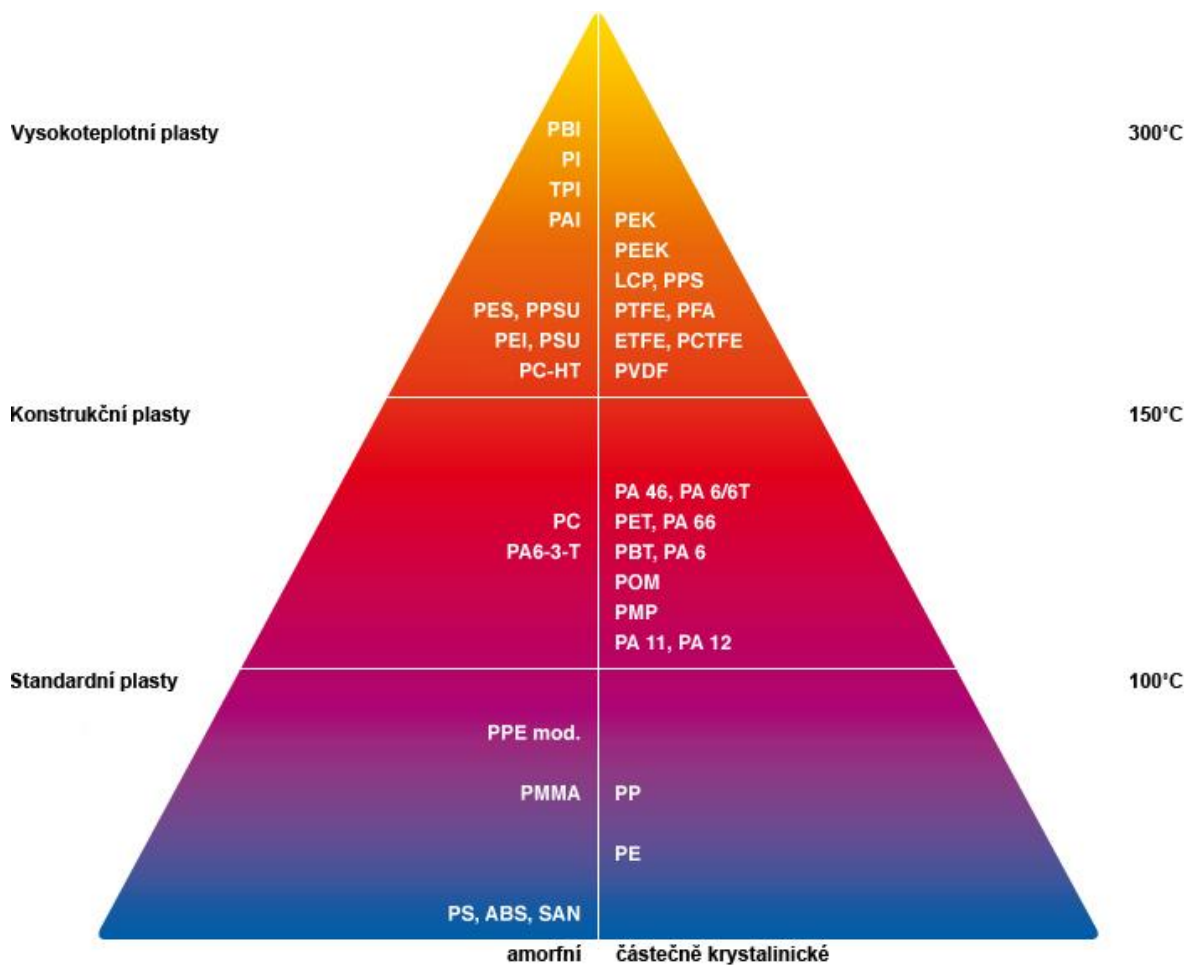
Z hlediska použití můžeme polymerní materiály rozdělit podle jejich použití a odolnosti, zejména teplotní do tří skupin na standardní, konstrukční a vysokoteplotní. [3,24]

Standardní plasty představují největší objem výroby a spotřeby plastů. Jsou výrobně nejlevnější. Používají se například jako obalový materiál. Patří sem polypropylen (PP), polyethylen (PE), polystyren (PS), polymethylmetakrylát (PMMA). [3,24]

Konstrukční plasty jsou oproti standardním dražší, ale vykazují lepší mechanické vlastnosti a vyšší teplotní odolnost. Využívají se u více namáhaných součástí. Patří sem například polykarbonát (PC), polyamid 6 (PA6), polyamid 66 (PA66), polyethyltereftalát (PET), polyoxymethylen(POM). [3,24]

Vysokoteplotní plasty jsou speciální plasty, které odolávají vysokým teplotám, ale jsou velmi drahé. Používají se v leteckém a kosmickém průmyslu. Patří sem například po-

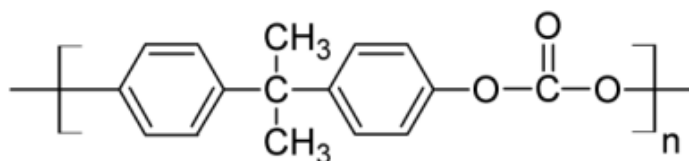
lyimid (PI), polybenzeimid (PBI), polysulfon (PSU). [3,24]



Obr. 27. Rozdělení plastů podle použití [25]

## 2.3 Polykarbonát

Polykarbonát je vysoce krystalický termoplast. Patří mezi nejpevnější polymery i při zvýšených tepelných podmínkách. Polykarbonát je stabilní v rozmezí teplot od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+135\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Má dobrou tepelnou odolnost, rázovou houževnatost, vysokou světelnou propustnost, odolnost proti povětrnostním vlivům a nízkou specifickou hmotnost. [29, 30, 31]



Obr. 28. Chemický vzorec polykarbonátu [32]

Vybrané vlastnosti polykarbonátu:

Tab. 3. Vybrané vlastnosti polykarbonátu [29]

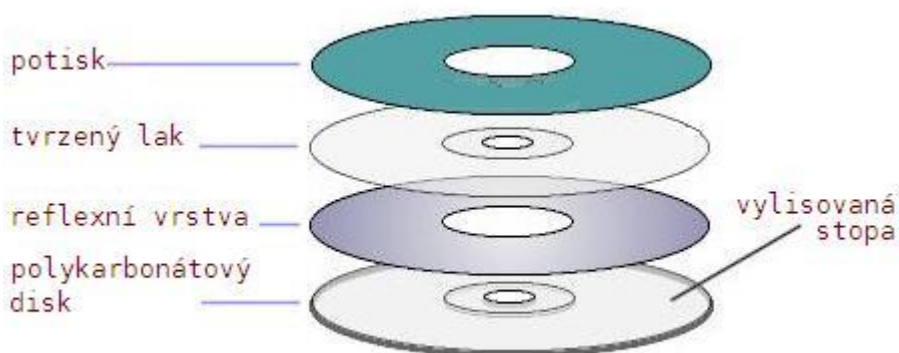
| Polykarbonát                        |                               |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Hustota ( $\rho$ )                  | 1 200–1 220 kg/m <sup>3</sup> |
| Index lomu (n)                      | 1,584                         |
| Youngův modul (E)                   | 2–2,4 GPa                     |
| Pevnost v tahu ( $\sigma_t$ )       | 55–75 MPa                     |
| Teplota tání ( $T_m$ )              | 267 °C                        |
| Teplota skelného přechodu ( $T_g$ ) | 150 °C                        |

Polykarbonát se vyrábí ve formě granulí, které se dále zpracovávají vytlačováním nebo vstřikováním. Patří mezi konstrukční plasty. [31]

### 2.3.1 Využití polykarbonátu

Světová roční spotřeba polykarbonátu je asi 3 miliony tun ročně a stále stoupá. Stále se vyvíjí nové typy polykarbonátů a vznikají tak nové možnosti aplikace. [31]

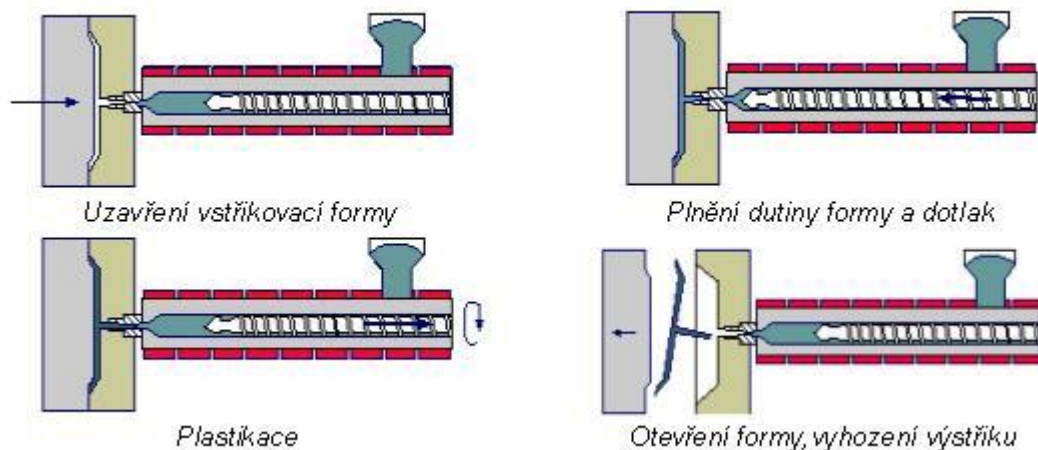
Největší množství polykarbonátu se spotřebuje ve stavebním průmyslu pro různé zastřešení. Velké uplatnění má polykarbonát také jako různé kryty a pláště elektrických přístrojů. Dále se používá například pro výrobu světel u automobilů, výrobu kompaktních disků atd. [31]



Obr. 29. Vrstvy kompaktního disku [33]

### 3 VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

Technologie vstřikování je nejrozšířenější a nejvýznamnější způsobem výroby plastových a elastomerních výrobků. Vstřikování se vyznačuje složitým fyzikálním procesem, na kterém se podílí polymer, vstřikovací stroj a vstřikovací forma. Touto technologií lze vyrábět i výrobky velice složitých tvarů pro téměř jakákoliv odvětví lidské činnosti. Během vstřikování je polymer ve vstřikovacím stroji ve formě granulí nasypán do násypky. Z násypky je odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje (např. šnekem), čímž je polymer dopravován do plastikační jednotky. V plastikační jednotce se šnek otáčí a posouvá zpět, zplastikovaný materiál se dopravuje před čelo šneku k trysce. Z polymeru se stává tavenina vlivem teploty a tření. Tavenina je posléze vstříknuta do dutiny formy, kterou musí úplně vyplnit. Následuje dotlak pro snížení smrštění a tvarových změn. Ve formě dojde k ochlazení polymeru a ztuhnutí na konečný výrobek, přičemž začíná plastikace další dávky materiálu. Po ochlazení na vyhazovací teplotu se forma otevře a výrobek z formy vyhodí a celý cyklus se opakuje. Jedná se tedy o cyklický proces. [23, 26]



Obr. 30. Vstřikovací cyklus [26]

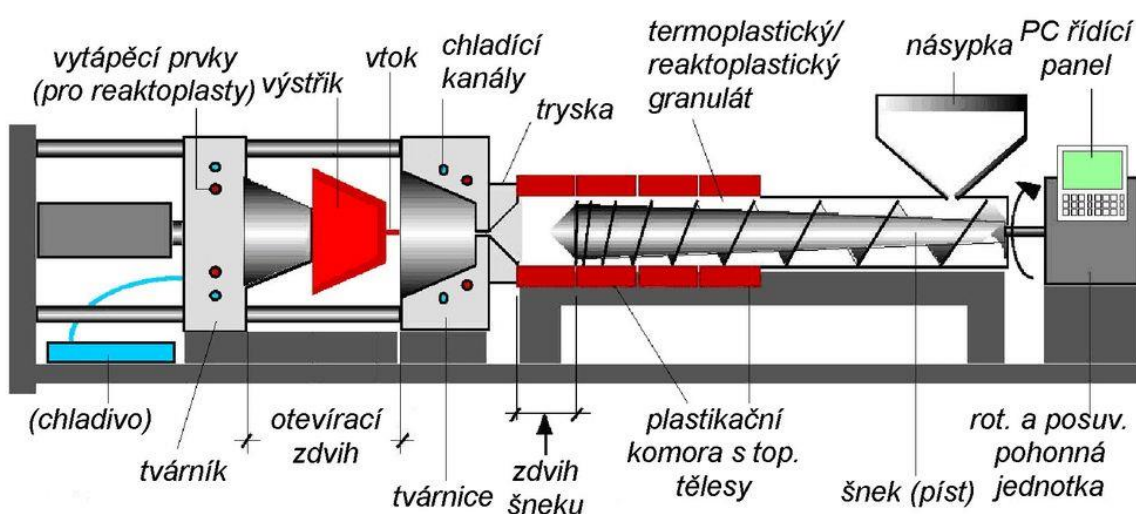
#### 3.1 Vstřikovací stroje

Vstřikování probíhá na moderních strojích automaticky, čímž se dosahuje velká produktivita práce. Pořizovací cena stroje a formy je ale velmi vysoká, proto je technologie vhodná pro hromadnou a sériovou výrobu. Vstřikovací stroj má tyto části: vstřikovací jednotku, uzavírací jednotku, řízení a regulaci. Ve vstřikovacím stroji se musí nejprve převést



tuhý materiál na taveninu a tuto taveninu dopravit a vstříknout do dutiny formy, která má tvar výrobku. [23, 26]

Podle konstrukce vstřikovací jednotky můžeme rozdělit vstřikovací stroje na stroje bez předplastikace a s předplastikací. U strojů bez předplastikace se materiál plastikuje v tavné komoře a do formy je vstříknut pístem, nebo se materiál plastikuje i vstřikuje šnekem. U strojů s předplastikací je plastikační jednotka oddělená od vstřikovací. Zplastikovaná směs se přetlačí do vstřikovacího válce a potom pístem vstříkne do formy. Tyto stroje se používají pro velké výstřiky. [23, 26]

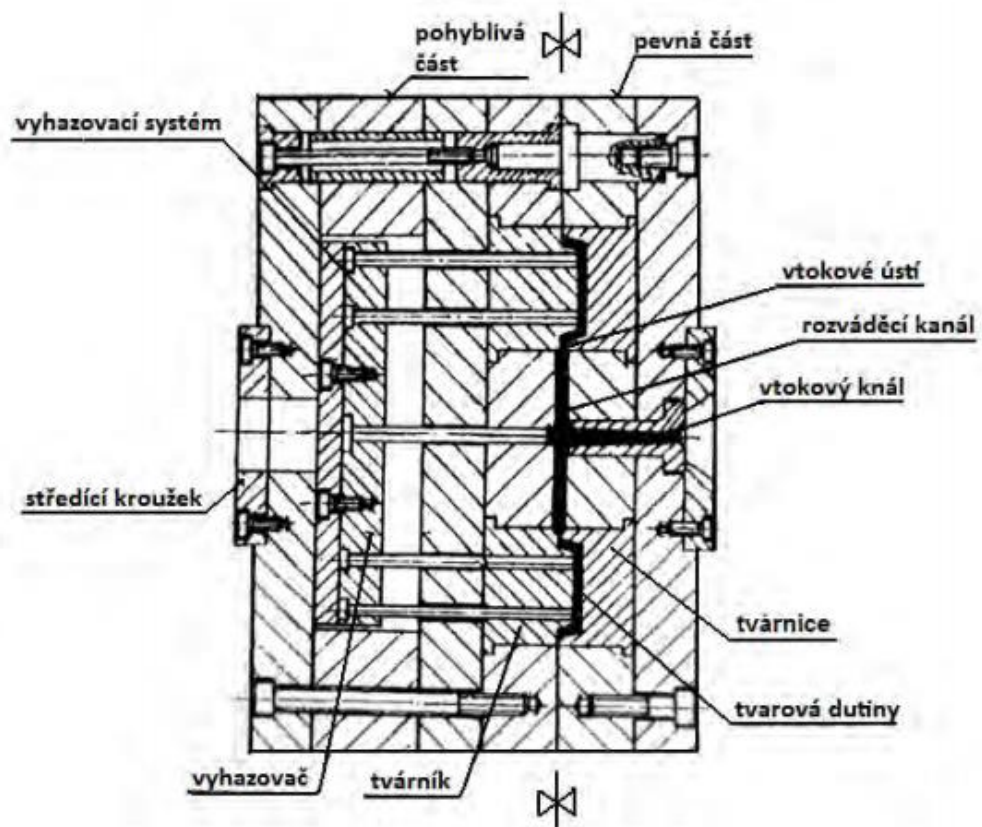


Obr. 31. Schéma vstřikovacího stroje [27]

### 3.2 Vstřikovací forma

Formy pro vstřikování musí být schopny odolat vysokým tlakům, musí být rozměrově přesné, aby byly přesné výstřiky, musí umožňovat snadné odformování a musí pracovat spolehlivě po celou dobu životnosti. Návrh formy závisí na tvaru a velikosti výstřiku, násobnosti formy, vlastností vstřikovaného polymeru. Forma musí zajišťovat rozvod taveniny do dutiny formy, přesnost dutiny formy a vyhození výstřiku. [23, 24, 26]

Vstřikovací forma má tři části. Vstřikovací, vyhazovací část a vyhazovací systém. Vstřikovací část se nepohybuje a zajišťuje vstříknutí taveniny do formy a rozvod do dutin formy. Vyhazovací část je pohyblivá a umožňuje uzavření a otevření formy v dělicí rovině. Vyhazovací systém provádí při otevřené formě vyhození výstřiku ven z formy, přičemž výstřik musí být ochlazen na vyhazovací teplotu. [23, 24, 26]



Obr. 32. Schéma vstřikovací formy [28]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo porovnání mechanických vlastností vybraných čtyř typů polykarbonátu (Calibre, Makrolon 2207, Nirion, Makrolon R30). Mechanické vlastnosti byly změřeny statickou zkouškou v tahu, dynamickou zkouškou vrubové houževnatosti metodou Charpy a zkoušky tvrdosti typu Shore D a IRHD. Každý soubor měření obsahoval vždy 10 kusů zkušebních těles. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cílem bakalářské práce bylo:

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

## 5 POPIS ZADANÝCH DRUHŮ POLYKARBONÁTU

Pro měření mechanických vlastností byly vybrány čtyři druhy polykarbonátu. Jedná se o Calibre, Makrolon 2207, Nirion, Makrolon R30.

### 5.1 Polykarbonát Calibre

#### Technical Information



#### CALIBRE™ 303EP-31 Polycarbonate Resin

**Overview** CALIBRE™ 303EP-31 Series are polycarbonate resins that offer exceptional impact resistance, heat distortion resistance, and optical clarity for injection molding applications. CALIBRE 303EP-31 has mold release and UV stabilizer.

Govt. and Industry Standards:  

- Underwriters Laboratory, Inc. (UL)

Applications:  

- Appliances
- Storage
- Electrical components
- Lighting

| Physical                                   | Nominal Value (English)   | Nominal Value (SI)     | Test Method          |
|--|---------------------------|------------------------|----------------------|
| Density                                    | 1.20 g/cm <sup>3</sup>    | 1.20 g/cm <sup>3</sup> | ISO 1183/B           |
| Melt Mass-Flow Rate (MFR) (300°C/1.2 kg)   | 31 g/10 min               | 31 g/10 min            | ISO 1133             |
| Molding Shrinkage - Flow                   | 0.0050 to 0.0070 in/in    | 0.50 to 0.70 %         | ISO 294-4            |
| Water Absorption                           |                           |                        | ISO 62               |
| 73°F (23°C), 24 hr                         | 0.15 %                    | 0.15 %                 |                      |
| Equilibrium, 73°F (23°C), 50% RH           | 0.32 %                    | 0.32 %                 |                      |
| Mechanical                                 | Nominal Value (English)   | Nominal Value (SI)     | Test Method          |
| Tensile Modulus                            | 334000 psi                | 2300 MPa               | ISO 527-2/50         |
| Tensile Stress                             |                           |                        | ISO 527-2/50         |
| Yield                                      | 8700 psi                  | 60.0 MPa               |                      |
| Break                                      | 10300 psi                 | 71.0 MPa               |                      |
| Tensile Strain                             |                           |                        | ISO 527-2/50         |
| Yield                                      | 6.0 %                     | 6.0 %                  |                      |
| Break                                      | 110 %                     | 110 %                  |                      |
| Flexural Modulus                           | 348000 psi                | 2400 MPa               | ISO 178 <sup>1</sup> |
| Flexural Strength                          | 14100 psi                 | 97.0 MPa               | ISO 178 <sup>1</sup> |
| Taber Abrasion Resistance                  | 45 %                      | 45 %                   | ISO 9352             |
| Impact                                     | Nominal Value (English)   | Nominal Value (SI)     | Test Method          |
| Charpy Notched Impact Strength             |                           |                        | ISO 179/1eA          |
| -22°F (-30°C)                              | 5.2 ft·lb/in <sup>2</sup> | 11 kJ/m <sup>2</sup>   |                      |
| 73°F (23°C)                                | 7.1 ft·lb/in <sup>2</sup> | 15 kJ/m <sup>2</sup>   |                      |
| Notched Izod Impact Strength (73°F (23°C)) | 33 ft·lb/in <sup>2</sup>  | 69 kJ/m <sup>2</sup>   | ISO 180/A            |
| Hardness                                   | Nominal Value (English)   | Nominal Value (SI)     | Test Method          |
| Rockwell Hardness                          |                           |                        | ISO 2039-2           |
| M-Scale                                    | 70                        | 70                     |                      |
| R-Scale                                    | 118                       | 118                    |                      |
| Thermal                                    | Nominal Value (English)   | Nominal Value (SI)     | Test Method          |
| Heat Deflection Temperature                |                           |                        |                      |
| 66 psi (0.45 MPa), Annealed                | 286 °F                    | 141 °C                 | ISO 75-2/B           |
| 264 psi (1.8 MPa), Annealed                | 280 °F                    | 138 °C                 | ISO 75-2/A           |
| Vicat Softening Temperature                | 293 °F                    | 145 °C                 | ISO 306/B50          |
| Ball Indentation Temperature               | > 257 °F                  | > 125 °C               | IEC 60335-1          |
| CLTE - Flow                                | 0.000039 in/in/°F         | 0.000070 cm/cm/°C      | ISO 11359-2          |

Obr. 33. Materiálový list Calibre

## 5.2 Polykarbonát Makrolon 2207

### Makrolon® 2207

General purpose grades / Low viscosity

MVR (300 °C/1.2 kg) 35 cm<sup>3</sup>/10 min; general purpose; low viscosity; UV stabilized; easy release; injection molding - melt temperature 280 - 320 °C; available in transparent, translucent and opaque colors

ISO Shortname

ISO 7391-PC,MLR,(,,)-24-9

| Property                           | Test Condition                         | Unit                    | Standard      | typical Value |
|------------------------------------|--|-------------------------|---------------|---------------|
| <b>Rheological properties</b>      |  |                         |               |               |
| C Melt volume-flow rate            | 300 °C; 1.2 kg                         | cm <sup>3</sup> /10 min | ISO 1133      | 34            |
| C Molding shrinkage, parallel      | 60x60x2 mm; 500 bar                    | %                       | ISO 294-4     | 0.65          |
| C Molding shrinkage, normal        | 60x60x2 mm; 500 bar                    | %                       | ISO 294-4     | 0.65          |
| Molding shrinkage, parallel/normal | Value range based on general practical | %                       | b.o. ISO 2577 | 0.5 - 0.7     |
| Melt mass-flow rate                | 300 °C; 1.2 kg                         | g/10 min                | ISO 1133      | 37            |

**Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)**

|                                      |                |                   |                           |        |
|--------------------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|--------|
| C Tensile modulus                    | 1 mm/min       | MPa               | ISO 527-1,-2              | 2400   |
| C Yield stress                       | 50 mm/min      | MPa               | ISO 527-1,-2              | 65     |
| C Yield strain                       | 50 mm/min      | %                 | ISO 527-1,-2              | 6.0    |
| C Nominal strain at break            | 50 mm/min      | %                 | ISO 527-1,-2              | > 50   |
| Stress at break                      | 50 mm/min      | MPa               | ISO 527-1,-2              | 60     |
| Strain at break                      | 50 mm/min      | %                 | b.o. ISO 527-1,-2         | 120    |
| C Tensile creep modulus              | 1 h            | MPa               | ISO 899-1                 | 2100   |
| C Tensile creep modulus              | 1000 h         | MPa               | ISO 899-1                 | 1700   |
| Flexural modulus                     | 2 mm/min       | MPa               | ISO 178                   | 2350   |
| Flexural strength                    | 2 mm/min       | MPa               | ISO 178                   | 98     |
| Flexural strain at flexural strength | 2 mm/min       | %                 | ISO 178                   | 7.0    |
| Flexural stress at 3.5 % strain      | 2 mm/min       | MPa               | ISO 178                   | 74     |
| C Charpy impact strength             | 23 °C          | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179-1eU               | N      |
| C Charpy impact strength             | -30 °C         | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179-1eU               | N      |
| Charpy impact strength               | -60 °C         | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179-1eU               | N      |
| Charpy notched impact strength       | 23 °C; 3 mm    | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 7391/b.o. ISO 179-1eA | 55P(C) |
| Charpy notched impact strength       | -30 °C; 3 mm   | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 7391/b.o. ISO 179-1eA | 12C    |
| Izod notched impact strength         | 23 °C; 3.2 mm  | kJ/m <sup>2</sup> | b.o. ISO 180-A            | 65P(C) |
| Izod notched impact strength         | -30 °C; 3.2 mm | kJ/m <sup>2</sup> | b.o. ISO 180-A            | 12C    |
| C Puncture maximum force             | 23 °C          | N                 | ISO 6603-2                | 4900   |
| C Puncture maximum force             | -30 °C         | N                 | ISO 6603-2                | 5900   |
| C Puncture energy                    | 23 °C          | J                 | ISO 6603-2                | 55     |
| C Puncture energy                    | -30 °C         | J                 | ISO 6603-2                | 60     |
| Ball indentation hardness            |                | N/mm <sup>2</sup> | ISO 2039-1                | 116    |

Obr. 34. Materiálový list Makrolon 2207\_1

| Property  | Test Condition  | Unit                   | Standard            | typical Value  |          |
|---|---|------------------------|---------------------|----------------|----------|
| <b>Thermal properties</b>                       |   |                        |                     |                |          |
| C   | Glass transition temperature  | 10 °C/min              | °C                  | ISO 11357-1,-2 | 144      |
| C   | Temperature of deflection under load                                  | 1.80 MPa               | °C                  | ISO 75-1,-2    | 123      |
| C   | Temperature of deflection under load                                  | 0.45 MPa               | °C                  | ISO 75-1,-2    | 136      |
| C   | Vicat softening temperature   | 50 N; 50 °C/h          | °C                  | ISO 306        | 143      |
|   | Vicat softening temperature   | 50 N; 120 °C/h         | °C                  | ISO 306        | 145      |
| C   | Coefficient of linear thermal expansion,                              | 23 to 55 °C            | 10 <sup>-4</sup> /K | ISO 11359-1,-2 | 0.65     |
| C   | Coefficient of linear thermal expansion,                              | 23 to 55 °C            | 10 <sup>-4</sup> /K | ISO 11359-1,-2 | 0.65     |
| C   | Burning behavior UL 94 [UL recognition]                               | 0.75 mm                | Class               | UL 94          | V-2 (CL) |
|   | Burning behavior UL 94 [UL recognition]                               | 2.9 mm                 | Class               | UL 94          | HB (CL)  |
| C   | Oxygen index  | Method A               | %                   | ISO 4589-2     | 28       |
|   | Thermal conductivity, cross-flow                                      | 23 °C; 50 % r. h.      | W/(m·K)             | ISO 8302       | 0.20     |
|   | Resistance to heat (ball pressure test)                               |                        | °C                  | IEC 60695-10-2 | 135      |
|   | Relative temperature index (Tensile strength) [UL recognition]        | 1.5 mm                 | °C                  | UL 746B        | 125      |
|   | Relative temperature index (Tensile impact strength) [UL recognition] | 1.5 mm                 | °C                  | UL 746B        | 115      |
|   | Relative temperature index (Electric strength) [UL recognition]       | 1.5 mm                 | °C                  | UL 746B        | 125      |
|   | Glow wire test (GWFI)   | 0.75 mm                | °C                  | IEC 60695-2-12 | 850      |
|   | Glow wire test (GWFI)   | 1.5 mm                 | °C                  | IEC 60695-2-12 | 875      |
|   | Glow wire test (GWFI)   | 3.0 mm                 | °C                  | IEC 60695-2-12 | 930      |
|   | Glow wire test (GWIT)   | 0.75 mm                | °C                  | IEC 60695-2-13 | 875      |
|   | Glow wire test (GWIT)   | 1.0 mm                 | °C                  | IEC 60695-2-13 | 875      |
|   | Glow wire test (GWIT)   | 1.5 mm                 | °C                  | IEC 60695-2-13 | 875      |
|   | Glow wire test (GWIT)   | 3.0 mm                 | °C                  | IEC 60695-2-13 | 875      |
|   | Application of flame from small burner                                | Method K and F; 2.0 mm | Class               | DIN 53438-1,-3 | K1, F1   |
|   | Needle flame test   | Method K; 1.5 mm       | s                   | IEC 60695-11-5 | 5        |
|   | Needle flame test   | Method K; 2.0 mm       | s                   | IEC 60695-11-5 | 5        |
|   | Needle flame test   | Method K; 3.0 mm       | s                   | IEC 60695-11-5 | 10       |
|   | Needle flame test   | Method F; 1.5 mm       | s                   | IEC 60695-11-5 | 60       |
|   | Needle flame test   | Method F; 2.0 mm       | s                   | IEC 60695-11-5 | 120      |
|   | Needle flame test   | Method F; 3.0 mm       | s                   | IEC 60695-11-5 | 120      |
|   | Burning rate (US-FMVSS)   | >=1.0 mm               | mm/min              | ISO 3795       | passed   |
|   | Flash ignition temperature  |                        | °C                  | ASTM D1929     | 480      |
|   | Self ignition temperature   |                        | °C                  | ASTM D1929     | 550      |
| <b>Electrical properties (23 °C/50 % r. h.)</b> |   |                        |                     |                |          |
| C   | Relative permittivity   | 100 Hz                 | -                   | IEC 60250      | 3.1      |
| C   | Relative permittivity   | 1 MHz                  | -                   | IEC 60250      | 3.0      |
| C   | Dissipation factor  | 100 Hz                 | 10 <sup>-4</sup>    | IEC 60250      | 5        |
| C   | Dissipation factor  | 1 MHz                  | 10 <sup>-4</sup>    | IEC 60250      | 90       |
| C   | Volume resistivity  |                        | Ohm·m               | IEC 60093      | 1E14     |
| C   | Surface resistivity   |                        | Ohm                 | IEC 60093      | 1E16     |
| C   | Electrical strength   | 1 mm                   | kV/mm               | IEC 60243-1    | 34       |
| C   | Comparative tracking index CTI  | Solution A             | Rating              | IEC 60112      | 250      |
|   | Comparative tracking index CTI M                                      | Solution B             | Rating              | IEC 60112      | 125M     |
|   | Electrolytic corrosion  |                        | Rating              | IEC 60426      | A1       |

Obr. 35. Materiálový list Makrolon 2207\_2



| Property  | Test Condition                 | Unit  | Standard      | typical Value |
|---|--------------------------------|---|---------------|---------------|
| <b>Other properties (23 °C)</b>                 |                                |   |               |               |
| C Water absorption (saturation value)           | Water at 23 °C                 | %   | ISO 62        | 0.30          |
| C Water absorption (equilibrium value)          | 23 °C; 50 % r. h.              | %   | ISO 62        | 0.12          |
| C Density                                       |                                | kg/m <sup>3</sup>                           | ISO 1183-1    | 1190          |
| Water vapor permeability                        | 23 °C; 85 % RH; 100 µm film    | g/(m <sup>2</sup> ·24 h)                    | ISO 15106-1   | 15            |
| Gas permeation                                  | Oxygen; 100 µm film            | cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar) | b.o. ISO 2556 | 750           |
| Gas permeation                                  | Oxygen; 25.4 µm (1 mil) film   | cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar) | b.o. ISO 2556 | 3150          |
| Gas permeation                                  | Nitrogen; 100 µm film          | cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar) | b.o. ISO 2556 | 150           |
| Gas permeation                                  | Nitrogen; 25.4 µm (1 mil) film | cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar) | b.o. ISO 2556 | 630           |
| Gas permeation                                  | Carbon dioxide; 100 µm film    | cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar) | b.o. ISO 2556 | 4500          |
| Gas permeation                                  | Carbon dioxide; 25.4 µm (1     | cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·24 h·bar) | b.o. ISO 2556 | 18900         |
| Bulk density                                    | Pellets                        | kg/m <sup>3</sup>                           | ISO 60        | 660           |
| <b>Material specific properties</b>             |                                |   |               |               |
| Refractive index                                | Procedure A                    | -   | ISO 489       | 1.586         |
| Haze for transparent materials                  | 3 mm                           | %   | ISO 14782     | < 0.8         |
| Luminous transmittance (clear                   | 1 mm                           | %   | ISO 13468-2   | 89            |
| C Luminous transmittance (clear                 | 2 mm                           | %   | ISO 13468-2   | 89            |
| Luminous transmittance (clear                   | 3 mm                           | %   | ISO 13468-2   | 88            |
| Luminous transmittance (clear                   | 4 mm                           | %   | ISO 13468-2   | 87            |
| <b>Processing conditions for test specimens</b> |                                |   |               |               |
| C Injection molding-Melt temperature            |                                | °C  | ISO 294       | 280           |
| C Injection molding-Mold temperature            |                                | °C  | ISO 294       | 80            |
| C Injection molding-Injection velocity          |                                | mm/s  | ISO 294       | 200           |

C These property characteristics are taken from the CAMPUS plastics data bank and are based on the international catalogue of basic data for plastics according to ISO 10350.

Impact properties: N = non-break, P = partial break, C = complete break

*Obr. 36. Materiálový list Makrolon 2207\_3*



### 5.3 Polykarbonát Nirion

# NIRION 3550/M



*Polycarbonate for injection moulding, suitable for general purpose, very high MFI and good impact Resistance.*

| Properties                          | Test Condition   | Method      | Unit                             | 3550/M Standard     |
|-------------------------------------|------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| <b>Rehological</b>                  |                  |             |                                  |                     |
| Melt flow index                     | 300°C - 1,2Kg    | ASTM D1238  | g/10'                            | 35-50               |
| <b>Mechanical</b>                   |                  |             |                                  |                     |
| Flexural maximum stress             | 1,3 mm/min       | ASTM D790   | Mpa                              | 80                  |
| Flexural elastic modulus            | 1,3 mm/min       | "           | Mpa                              | 2400                |
| IZOD notched impact Strength 3.2 mm | 23°C 3,2 mm      | ASTM D256   | j/m                              | 450                 |
|                                     | - 20°C 3,2 mm    | "           | j/m                              | 50                  |
| Rockwell hardness                   |                  | ASTM D785   | Scala R                          | 65                  |
| <b>Thermal</b>                      |                  |             |                                  |                     |
| Vicat softening temperature         | 49N/120°C/h      | ASTM D1525  | °C                               | 143                 |
| Heat distortion temperature         | 1,82 Mpa         | ASTM D648   | °C                               | 122                 |
| Linear expansion coefficient        | 23/55 °C         | ISO 11359-2 | 10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup> | 7                   |
| <b>Flame behaviour</b>              |                  |             |                                  |                     |
| Glow wire temperature GWT           | S=2,0mm          | IEC 695-2-1 | °C                               | 850                 |
| <b>Electrical</b>                   |                  |             |                                  |                     |
| Relative permittivity               | 1 MHz = secco    | IEC 60250   | -                                | 3                   |
| Dissipation factor                  | 1 MHz = secco    | IEC 60250   | -                                | 90x10 <sup>-4</sup> |
| Dielectric strength                 | S=1mm            | IEC 60243-1 | KV/mm                            | 25                  |
| Surface resistivity                 | secco            | IEC 60093   | ohm                              | 10 <sup>15</sup>    |
| Volume resistivity                  | secco            | IEC 60093   | ohm cm.                          | 10 <sup>14</sup>    |
| <b>Various</b>                      |                  |             |                                  |                     |
| Density                             | 23°C             | ASTM D792   | g/cm <sup>3</sup>                | 1,2                 |
| Humidity content at equilibrium     | 23°C/50%UR       | ISO 62      | %                                | 0,12                |
| Water absorption                    | Saturazione 23°C | ISO 62      | %                                | 0,3                 |
| Moulding shrinkage                  | Parallelo        | -           | %                                | 0,5-0,8             |
|                                     | Normale          | -           |                                  | -                   |

NOTE:

Data are provided for guidance purpose only, and cannot be considered as Sale Specification.

*Obr. 37. Materiálový list Nirion*

## 5.4 Polykarbonát Makrolon R30

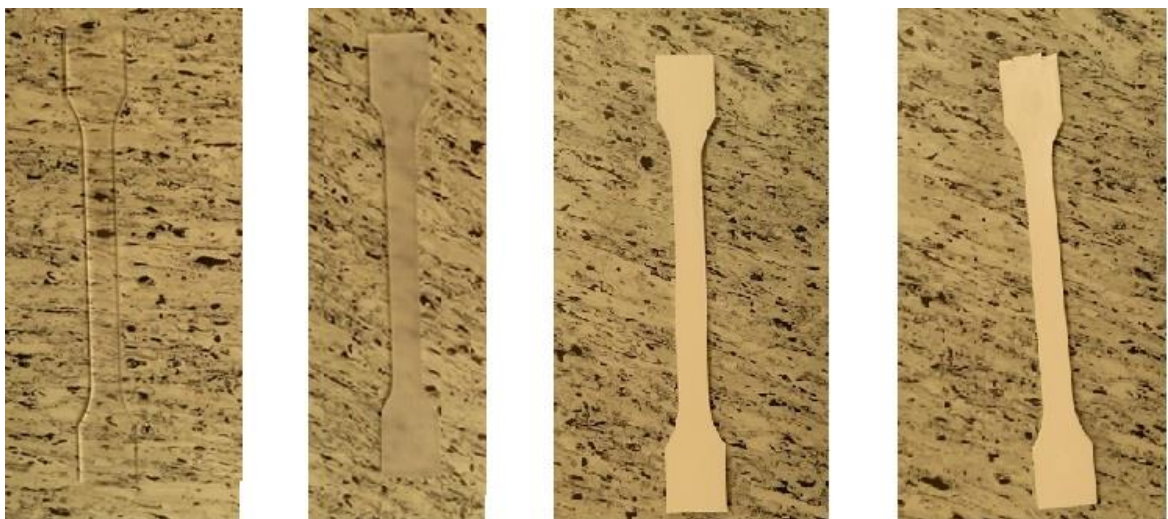
### Polycarbonate R (PC R)

| Typical Values                                       |                 |                           |                |                |        |        |
|--|-----------------|---------------------------|----------------|----------------|--------|--------|
| Properties   | Test Conditions | Units                     | Standards      | Non reinforced |        |        |
|  |                 |                           |                | PC R30         | PC R17 | PC R8  |
| <b>Rheological properties</b>                        |                 |                           |                |                |        |        |
| C Melt volume-flow rate                              | 300 °C; 1.2 kg  | cm <sup>3</sup> /(10 min) | ISO 1133       | 33             | 19     | 10.5   |
| C Melt mass-flow rate                                | 300 °C; 1.2 kg  | g/(10 min)                | ISO 1133       | 35             | 20     | 11     |
| <b>Mechanical properties (23 °C/50 %r.h.)</b>        |                 |                           |                |                |        |        |
| C Tensile modulus                                    | 1 mm/min        | MPa                       | ISO 527-1,-2   | 2100           | 2200   | 2200   |
| C Yield stress                                       | 50 mm/min       | MPa                       | ISO 527-1,-2   | 55             | 55     | 55     |
| C Yield strain                                       | 50 mm/min       | %                         | ISO 527-1,-2   | 5.5            | 5.5    | 5.5    |
| C Charpy impact strength                             | 23 °C           | kJ/m <sup>2</sup>         | ISO 179-1eU    | N              | N      | N      |
| Izod notched impact strength                         | 23 °C; 3.2 mm   | kJ/m <sup>2</sup>         | acc. ISO 180-A | 50P            | 30C(P) | 50P(C) |
| <b>Thermal properties</b>                            |                 |                           |                |                |        |        |
| C Vicat softening temperature                        | 50 N; 50 °C/h   | °C                        | ISO 306        | 142            | 144    | 144    |
| C Burning behavior UL 94                             | 1.0 mm          | Class                     | UL 94          | V-2 (GY)       |        |        |
| UL recognition                                       | 1.0 mm          |                           |                | UL             |        |        |
| Relative temperature index (Tensile strength)        | 1.0 mm          | °C                        | UL 746 B       | 80             |        |        |
| Relative temperature index (Tensile impact strength) | 1.0 mm          | °C                        | UL 746 B       | 80             |        |        |
| Relative temperature index (Electric strength)       | 1.0 mm          | °C                        | UL 746 B       | 80             |        |        |
| <b>Other properties (23 °C)</b>                      |                 |                           |                |                |        |        |
| C Density  | -               | kg/m <sup>3</sup>         | ISO 1183       | 1200           | 1200   | 1200   |
| <b>Processing conditions for test specimens</b>      |                 |                           |                |                |        |        |
| C Injection molding-Melt temperature                 | -               | °C                        | ISO 294        | 280            | 280    | 290    |
| C Injection molding-Mold temperature                 | -               | °C                        | ISO 294        | 80             | 80     | 80     |
| C Injection molding-Injection velocity               | -               | mm/s                      | ISO 294        | 200            | 200    | 200    |

C These property characteristics are taken from the CAMPUS plastics data bank and are based on the international catalogue of basic data for plastics according to ISO 10380.  
 Impact properties: N = non-break, P = partial break, C = complete break  
 Burning behavior UL 94: GY = Gray, BK = Black

Obr. 38. Materiálový list Makrolon R30

## 5.5 Vzhledové porovnání výrobků z uvedených typů polykarbonátu



Obr. 39. Vzhledové porovnání typů polykarbonátu – zleva: Calibre, Makrolon 2207, Niri-on, Makrolon R30

## 5.6 Vstřikovací podmínky

Tab. 4. Nastavení vstřikovacích podmínek

|                                    |                                |        |        |        |                   |
|------------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|-------------------|
| <b>Teplota taveniny</b>            | 300 °C                         |        |        |        |                   |
| <b>Teplota formy</b>               | 100 °C                         |        |        |        |                   |
| <b>Vyhazovací teplota</b>          | 130 °C                         |        |        |        |                   |
| <b>Teplota temperačního média</b>  | 100 °C                         |        |        |        |                   |
| <b>Vstřikování rychlost / tlak</b> | 60 mm·s <sup>-1</sup> / 60 MPa |        |        |        |                   |
| <b>Dotlak délka / velikost</b>     | 30 s / 35 MPa                  |        |        |        |                   |
| <b>Bod přepnutí</b>                | 9,5 mm                         |        |        |        |                   |
| <b>Doba cyklu</b>                  | 55 sekund                      |        |        |        |                   |
| <b>Teploty jednotlivých pásem</b>  | Výstupní<br>300 °C             | 295 °C | 290 °C | 285 °C | Vstupní<br>280 °C |

## 6 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Naměřené hodnoty jsou statisticky zpracovány, graficky zpracovány a vyhodnoceny. Naměřené hodnoty jsou zpracovány pomocí následujících statistických vzorců.

a) Odhad aritmetického průměru:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (17)$$

Příčemž:  $\bar{X}$  je odhad aritmetického průměru [–]

$x_i$  je i-tá hodnota měřené veličiny [–]

$n$  je počet měření [–]

b) Odhad směrodatné odchylky:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

c) Nejistota měření typu A (střední kvadratická chyba aritmetického průměru):

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (18)$$

Příčemž:  $S$  je odhad směrodatné odchylky [–]

$u_a$  je nejistota měření typu A [–]

$\bar{X}$  je odhad aritmetického průměru [–]

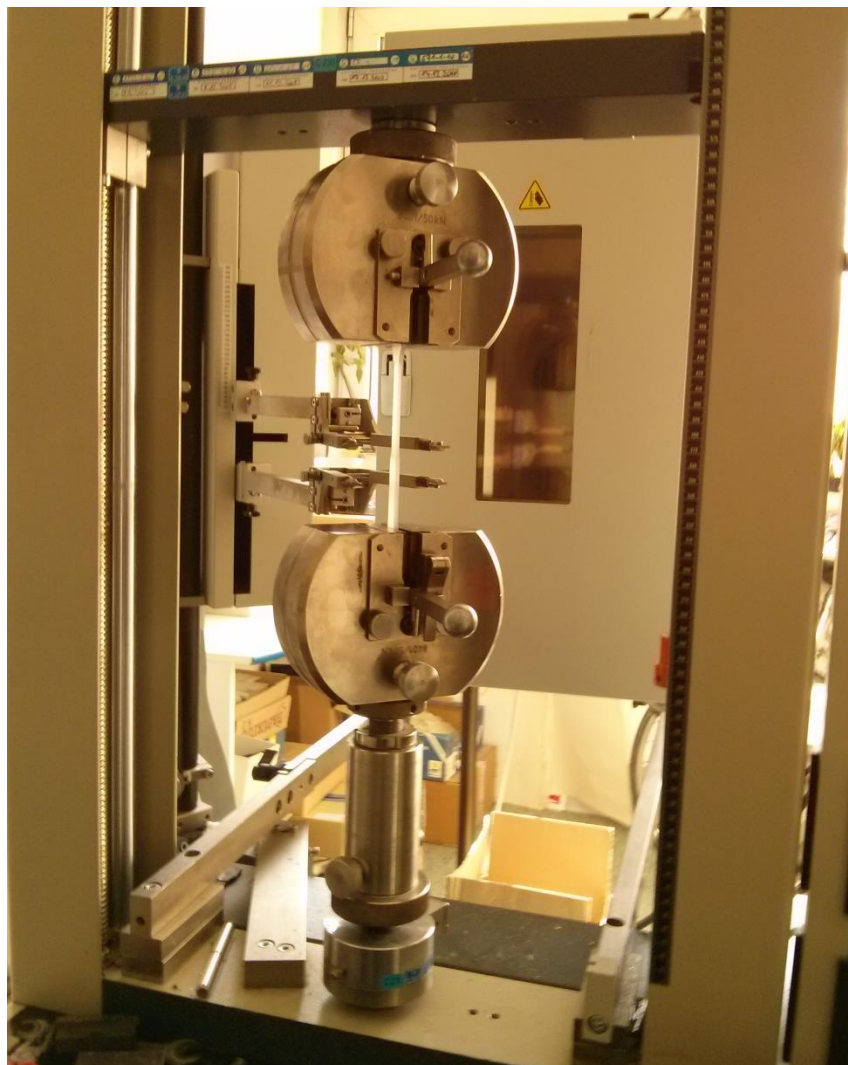
$x_i$  je i-tá hodnota měřené veličiny [–]

$n$  je počet měření [–]

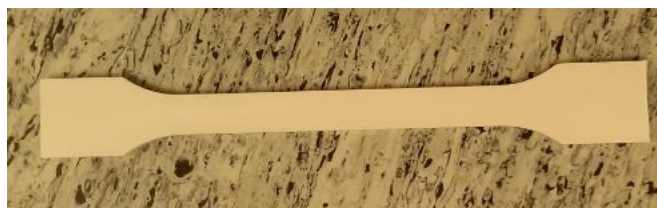
## 6.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním trhacím stroji Zwick 1456. Před každým jednotlivým měřením byl stroj vynulován a do připravených čelistí bylo upnuto zkušební tělísko. Šířka krčku zkušebního tělesa je 10 mm a tloušťka je 4 mm.

Zaznamenány byly tyto veličiny: Napětí na mezi pevnosti v tahu ( $R_m$ ), modul pružnosti v tahu ( $E$ ) a poměrné prodloužení ( $\epsilon$ ).



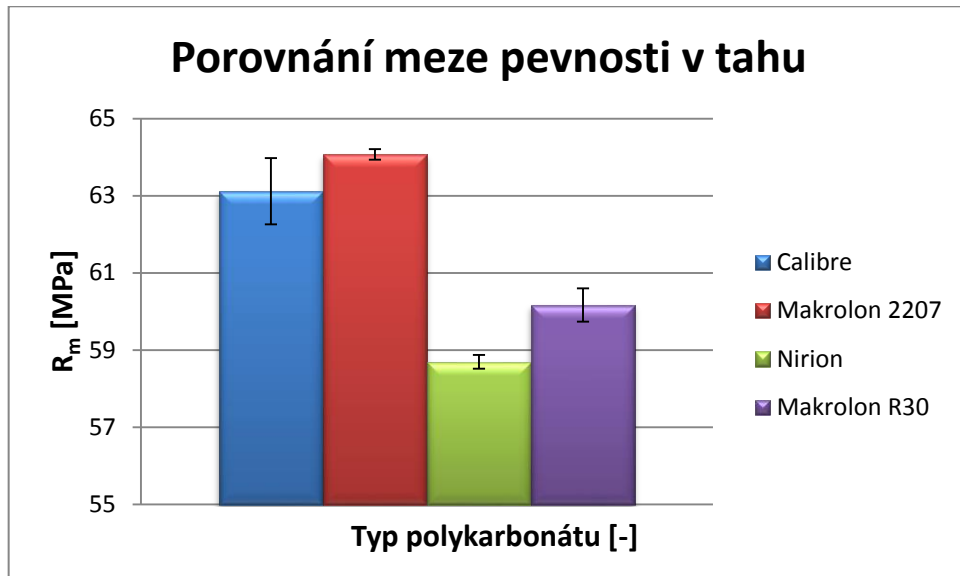
*Obr. 40. Zkouška tahem*



*Obr. 41. Zkušební vzorek*

## 6.1.1 Naměřené hodnoty tahové zkoušky a jejich vyhodnocení

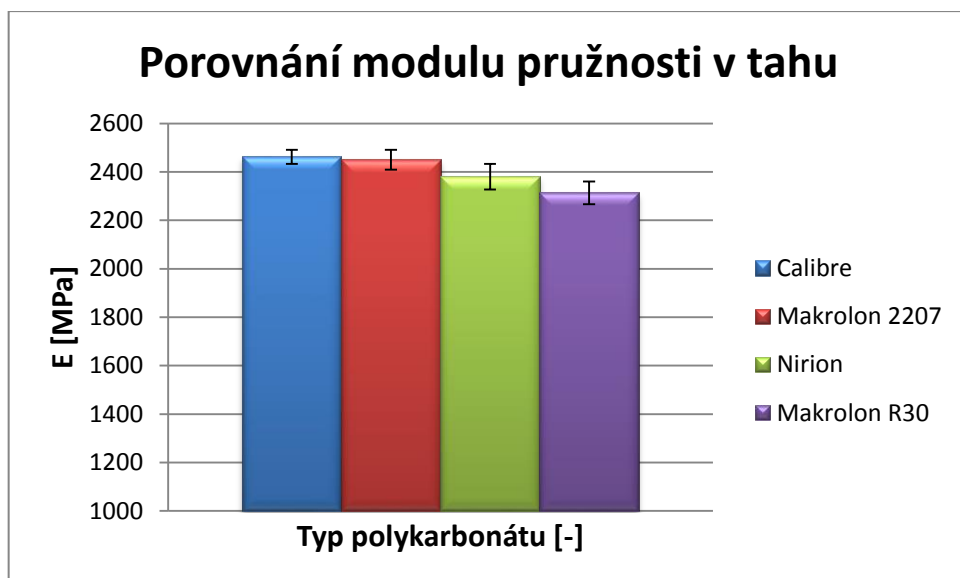
### 6.1.1.1 Porovnání meze pevnosti v tahu



Obr. 42. Porovnání meze pevnosti v tahu

Z výsledků tahové zkoušky vyplynulo, že nejvyšší hodnota meze pevnosti v tahu (maximální napětí) byla zjištěna u materiálu Makrolon 2207 ( $R_m = 64,1$  MPa). Naopak nejnižší hodnota meze pevnosti v tahu (maximální napětí) byla naměřena u materiálu Nirion ( $R_m = 58,7$  MPa), jak je patrné z obrázku 42.

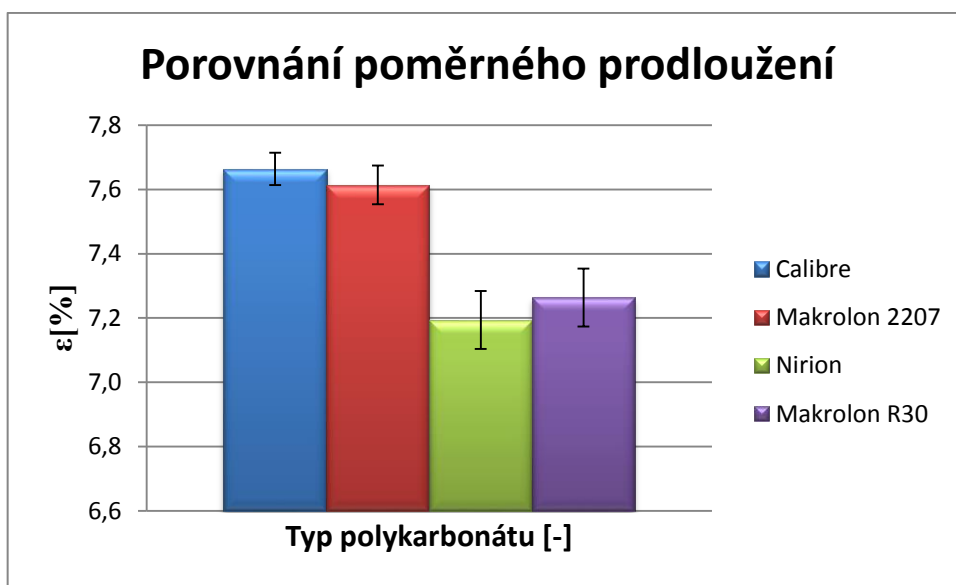
### 6.1.1.2 Porovnání modulu pružnosti v tahu



Obr. 43. Porovnání modulu pružnosti

Z výsledků tahové zkoušky vyplynulo, že nejvyšší hodnota modulu pružnosti v tahu byla zjištěna u materiálu Calibre ( $E = 2463$  MPa). Naopak nejnižší hodnota modulu pružnosti v tahu byla naměřena u materiálu Makrolon R30 ( $E = 2314$  MPa), jak je patrné z obrázku 43.

### 6.1.1.3 Porovnání poměrného prodloužení



Obr. 44. Porovnání poměrného prodloužení

Z výsledků tahové zkoušky vyplynulo, že nejvyšší hodnota poměrného prodloužení byla zjištěna u materiálu Calibre ( $\epsilon = 7,7$  %). Naopak nejnižší hodnota poměrného prodloužení byla naměřena u materiálu Nirion ( $\epsilon = 7,2$  %), jak je patrné z obrázku 44.

## 6.2 Zkouška tvrdosti typu Shore D

Zkouška tvrdosti byla provedena na tvrdoměru OMAG AFRI ART 13. U každého typu polykarbonátu bylo provedeno 10 měření na zkušebních vzorcích. Jednotlivé měření trvalo 5 s.

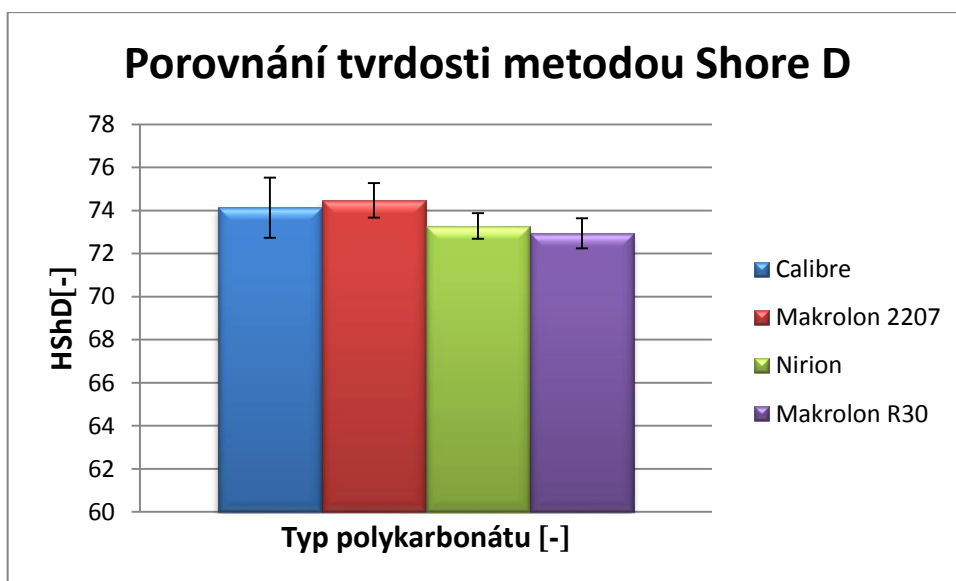




Obr. 45. Tvrdoměr typu Shore D

## 6.2.1 Naměřené hodnoty tvrdosti metodou Shore D a jejich vyhodnocení

### 6.2.1.1 Porovnání tvrdosti metodou Shore D



Obr. 46. Porovnání tvrdosti metodou Shore D



Z výsledků zkoušky tvrdosti metodou Shore D vyplynulo, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna u materiálu Makrolon 2207 (HShD/5:74,5). Naopak nejnižší hodnota tvrdosti byla naměřena u materiálu Makrolon R30 (HShD/5:72,9), jak je patrné z obrázku 46.

### 6.3 Zkouška tvrdosti typu IRHD

Zkouška tvrdosti IRHD byla provedena na tvrdoměru OMAG AFFRI typu IRHD, metodou N. U každého typu polykarbonátu bylo provedeno 5 měření na zkušebních vzorcích. Zatížení kontaktní silou trvalo 5 s a zatížení vlačovací silou trvalo 30 s. Celková síla byla 5,7 N.



Obr. 47. Tvrdoměr typu IRHD

### 6.3.1 Naměřené hodnoty tvrdosti metodou IRHD a jejich vyhodnocení

#### 6.3.1.1 Porovnání tvrdosti metodou IRHD



Obr. 48. Porovnání tvrdosti metodou IRHD

Z výsledků zkoušky tvrdosti metodou IRHD vyplynulo, že hodnota tvrdosti byla zjištěna u všech materiálů totožná ( $IRHD = 99,9^\circ$ ), jak je patrné z obrázku 48.

### 6.4 Zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy

Zkouška vrubové houževnatosti byla provedena na stroji CEAST Resil Impactor Junior. Šířka zkušebního tělesa je 10 mm a tloušťka je 4 mm. Vrub je typu V a má hloubku 2 mm. Cílem bylo postupné přeražení vzorků. Kladivo bylo nastaveno do horní polohy a zajištěno zajišťovacím kolíkem. Zkušební vzorek byl umístěn ve stojanu vrubem orientovaným ve směru pohybu kladiva.

Zaznamenány byly tyto veličiny: Vrubová houževnatost ( $a_k$ ) a síla potřebná k přeražení vzorku ( $F_m$ ).



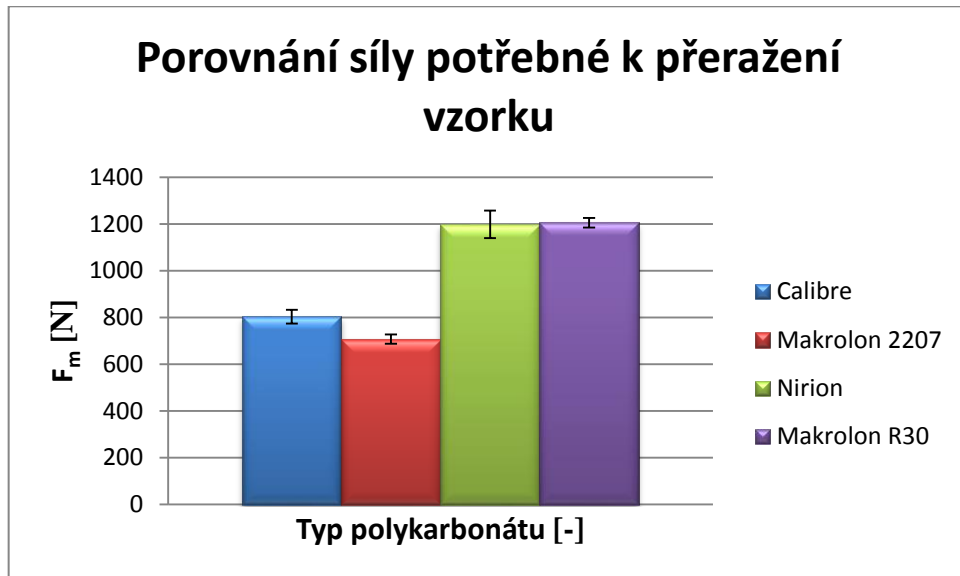
*Obr. 49. Charpyho kladivo*



*Obr. 50. Zkušební vzorek opatřený V – vrubem*

## 6.4.1 Naměřené hodnoty zkoušky vrubové houževnatosti a jejich vyhodnocení

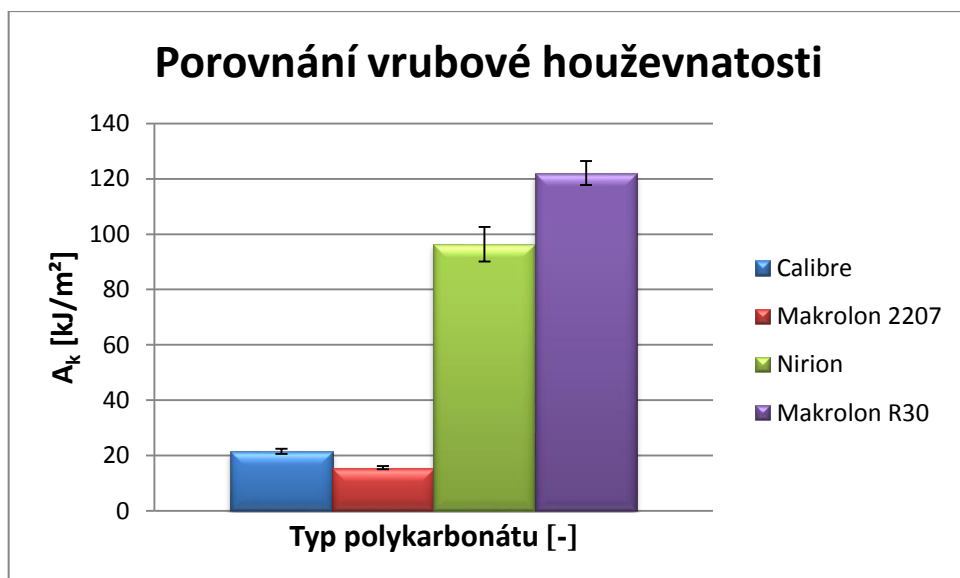
### 6.4.1.1 Porovnání síly potřebné k přeražení vzorku



Obr. 51. Porovnání síly potřebné k přeražení vzorku

Z výsledků zkoušky vrubové houževnatosti Charpyho metodou vyplynulo, že nejvyšší hodnota síly na přeražení vzorku byla zjištěna u materiálu Makrolon R30 ( $F_m = 1205$  N). Naopak nejnižší hodnota síly na přeražení vzorku byla naměřena u materiálu Makrolon 2207 ( $F_m = 707$  N), jak je patrné z obrázku 51.

### 6.4.1.2 Porovnání vrubové houževnatosti



Obr. 52. Porovnání vrubové houževnatosti

Z výsledků zkoušky vrubové houževnatosti Charpyho metodou vyplynulo, že nejvyšší hodnota vrubové houževnatosti byla zjištěna u materiálu Makrolon R30 ( $A_k = 122 \text{ kJ/m}^2$ ). Naopak nejnižší hodnota vrubové houževnatosti byla naměřena u materiálu Makrolon 2207 ( $A_k = 16 \text{ kJ/m}^2$ ), jak je patrné z obrázku 52.

## ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala porovnáním mechanických vlastností vybraných čtyř typů polykarbonátu (Calibre, Makrolon 2207, Nirion, Makrolon R30). Mechanické vlastnosti byly změřeny statickou zkouškou v tahu, dynamickou zkouškou vrubové houževnatosti metodou Charpy a zkoušky tvrdosti typu Shore D a IRHD. Každý soubor měření obsahoval vždy 10 kusů zkušebních těles. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledku měření tahové zkoušky vyplynulo, že nejvyšší hodnoty meze pevnosti v tahu, která nám reprezentuje maximální napětí, bylo dosaženo u materiálu Makrolon 2207 ( $R_m = 64,1$  MPa). Nejmenší hodnota maximálního napětí byla naopak zjištěna u materiálu Nirion ( $R_m = 58,7$  MPa). Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu bylo dosaženo u materiálu Calibre ( $E = 2463$  MPa). Nejmenší hodnota modulu pružnosti v tahu byla naopak zjištěna u materiálu Makrolon R30 ( $E = 2314$  MPa). Nejvyšší hodnoty poměrného prodloužení bylo dosaženo u materiálu Calibre ( $\varepsilon = 7,7$  %). Nejmenší hodnota poměrného prodloužení byla naopak zjištěna u materiálu Nirion ( $\varepsilon = 7,2$  %). Rozdílné chování testovaných polykarbonátů bylo způsobeno pravděpodobně rozdílnými vlastnostmi (délka řetězců apod.).

Při měření tvrdosti bylo zjištěno, že mezi testovanými materiály nebyl zjištěn výrazný rozdíl v hodnotách tvrdosti. Z výsledku měření tvrdosti metodou Shore D vyplynulo, že nejvyšší hodnoty tvrdosti bylo dosaženo u materiálu Makrolon 2207 (HShD/5:74,5). Nejmenší hodnota tvrdosti metodou Shore D byla naopak zjištěna u materiálu Makrolon R30 (HShD/5:72,9). Téměř totožné výsledky byly naměřeny u metody IRHD, která nebude vhodnou metodou pro tento typ polymerního materiálu.

Nejvýraznější změny hodnot byly zaznamenány při zkoušce vrubové houževnatosti testované na Charpyho kladivu. Zde byly naměřené výsledky u jednotlivých testovaných polykarbonátů odlišné. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u polykarbonátu Makrolon R30 ( $A_k = 122$  kJ/m<sup>2</sup>). Naopak nejmenší hodnota byla zjištěna u polykarbonátu Makrolon 2207 ( $A_k = 16$  kJ/m<sup>2</sup>).

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Hluchý, M., a kolektiv: Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu. 2. vyd. Praha: SNTL, 1978. 360 s. ISBN 04-212-78
- [2] Lángová, E., Vliv podílu kaučuku a plniva na mechanické vlastnosti kompozit epoxidová pryskyřice/silikonový kaučuk/uhlíkové saze, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, vedoucí diplomové práce Ing. Michaela Pelíšková, Ph.D.
- [3] Jurčová, M., Testování mechanických vlastností modifikovaných polymerů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013, vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [4] ČSN EN ISO 527 – 1 Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Základní principy
- [5] Zkouška tahem [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.kluvi.com/index.php?menu=2&page=download&soubor=43&akce=stahnout>>
- [6] Mechanické vlastnosti pevných látek [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <[http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha12\\_mechan\\_vl.pdf](http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha12_mechan_vl.pdf)>
- [7] Struktura a vlastnosti materiálu a jejich zkoušení [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <[http://umi.fs.cvut.cz/files/3\\_2\\_\\_struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/files/3_2__struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf)>
- [8] Schätz, M., Vondráček, P., Zkoušení polymerů, Praha: SNTL, 1979
- [9] Plasty [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <[http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM2/PLASTY\\_podklady.ppt](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/PLASTY_podklady.ppt)>
- [10] BrinellHardness [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:BrinellHardness.svg>>
- [11] Zkouška tvrdosti podle Brinella [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.kluvi.com/index.php?menu=2&page=download&soubor=49&akce=stahnout>>
- [12] Zkoušky tvrdosti [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW:

- <[http://www.metrotest.cz/files/zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf)>
- [13] Rybníkář, F., Ditrych, Z., Klácel, Z., Ordelt, O., Analýza a zkoušení plastických hmot, Praha: SNTL, 1965
- [14] Martinek, M., Měření tvrdosti polymerů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [15] Zkouška tvrdosti podle Rockwella [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.kluvi.com/index.php?menu=2&page=download&soubor=51&akce=stahnout>>
- [16] Princip měření tvrdosti podle Rockwella [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.matnet.sav.sk/data/files/471.JPG>>
- [17] Zkoušky tvrdosti podle Vickerse [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.kluvi.com/index.php?menu=2&page=download&soubor=50&akce=stahnout>>
- [18] Princip měření tvrdosti podle Vickerse [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.matnet.sav.sk/data/files/461.JPG>>
- [19] Základní mechanické vlastnosti polymerů a jejich hodnocení [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <[http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/NEkM/NeM%20Kro/Mechanice%20vlastnosti%20polymeru.ppt](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NeM%20Kro/Mechanice%20vlastnosti%20polymeru.ppt)>
- [20] Zkouška rázem v ohybu [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.kluvi.com/index.php?menu=2&page=download&soubor=44&akce=stahnout>>
- [21] Plasty [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf>>
- [22] Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z 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)>
- [23] Hudcovič, M., Využití optimalizace vstřikovacího procesu při výrobě plastových dílů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, Vedoucí diplomové práce ing. Michal Staněk, Ph.D.



- [24] Skovsaja, L., Vliv změny procesních parametrů vstřikování na výsledné mechanické vlastnosti plněných polymerů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Mañas, Ph.D.
- [25] Materiály [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.ensinger.cz/cz/materialy/>>
- [26] Vstřikování plastů [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm)>
- [27] Schéma vstřikovacího stroje [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04-vstrikovani%20plastu/06-vstrikovaci%20stroj%20schema.jpg](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04-vstrikovani%20plastu/06-vstrikovaci%20stroj%20schema.jpg)>
- [28] Vstřikovací formy [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupný z WWW: <[http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni\\_soubory/htn\\_tvareci\\_nastroje\\_vstrikovaci\\_formy\\_zak.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/htn_tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy_zak.pdf)>
- [29] Polykarbonát [online]. [cit. 2014-01-29]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polykarbon%C3%A1t>>
- [30] Základné vlastnosti polykarbonátu [online]. [cit. 2014-01-29]. Dostupný z WWW: <[http://www.mikas.sk/download/vlastnosti\\_polykarbonatu.pdf](http://www.mikas.sk/download/vlastnosti_polykarbonatu.pdf)>
- [31] Plasty pro stavebnictví a architekturu 3 – Polykarbonát (PC) [online]. [cit. 2014-01-29]. Dostupný z WWW: <[http://www.happymaterials.com/imgs/articles/153-3\\_3\\_PC.pdf](http://www.happymaterials.com/imgs/articles/153-3_3_PC.pdf)>
- [32] PC - Polykarbonát [online]. [cit. 2014-01-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pc.html>>
- [33] Následovníci kompaktních disků: DVD [online]. [cit. 2014-01-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.root.cz/clanky/nasledovnici-kompaktnich-disku-dvd>>
- [34] Fabriger, D., Měření tvrdosti polymerů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Mañas, Ph.D.
- [35] Shore hardness [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupný z WWW: <<https://germanreprap.com/en/support/shore>>
- [36] Digitální tvrdoměry Shore, IRHD [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.zwick.cz/cs/produkty/tvrdomery/tvrdomery-shore-irhd>>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|           |   |
|-----------|---|
| a         | Rozměr  |
| $A_k$     | Vrubová houževnatost                                    |
| $A_n$     | Rázová houževnatost                                     |
| b         | Rozměr  |
| $b_h$     | Tloušťka pod vrubem                                     |
| D         | Průměr kuličky  |
| $d_{1,2}$ | Průměr vtisku kuličky; Délka úhlopříčky                 |
| E         | Modul pružnosti v tahu – Youngův modul pružnosti v tahu |
| F         | Síla  |
| $F_K$     | Síla na mezi kluzu                                      |
| $F_m$     | Síla potřebná k přeražení vzorku                        |
| $F_{max}$ | Síla na mezi pevnosti                                   |
| $F_r$     | Redukované zkušební zatížení                            |
| g         | Tíhové zrychlení  |
| HB        | Tvrдость podle Brinella                                 |
| HR        | Tvrдость podle Rockwella                                |
| HSh       | Tvrдость podle Shore                                    |
| HV        | Tvrдость podle Vickerse                                 |
| h         | Hloubka vtisku; Rozměr                                  |
| $h_r$     | Redukovaná hloubka vtlačení kuličky                     |
| IRHD      | Mezinárodní stupnice tvrdosti                           |
| $L_0$     | Původní rozměr  |
| $L_c$     | Rozměr  |
| $L_t$     | Rozměr  |

---

|               |  |
|---------------|--|
| $l$           | Délka zkušebního tělesa po zkoušce                             |
| $l_0$         | Původní rozměr   |
| $n$           | Index lomu; Počet měření                                       |
| PC            | Polykarbonát   |
| $R_m$         | Napětí na mezi pevnosti v tahu                                 |
| $S$           | Průřez zkušebního tělesa po zkoušce; Odhad směrodatné odchylky |
| $S_0$         | Původní průřez   |
| $T_g$         | Teplota skelného přechodu                                      |
| $T_m$         | Teplota tání   |
| $u_a$         | Nejistota měření typu A  |
| $W$           | Práce  |
| $\bar{X}$     | Odhad aritmetického průměru                                    |
| $x_i$         | $i$ -tá hodnota měřené veličiny                                |
| $Z$           | Zúžení   |
| $\alpha$      | Konstanta; Vrcholový úhel                                      |
| $\varepsilon$ | Poměrné prodloužení  |
| $\pi$         | Ludolfovo číslo  |
| $\rho$        | Hustota  |
| $\sigma_{PT}$ | Mez pevnosti v tahu  |
| $\sigma_Y$    | Mez kluzu v tahu   |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| <i>Obr. 1. Nejčastější druhy namáhání materiálu [1]</i> .....  | 12 |
| <i>Obr. 2. Univerzální zkušební stroj [1]</i> .....  | 13 |
| <i>Obr. 3. Tvar zkušebního tělesa [5]</i> .....  | 14 |
| <i>Obr. 4. Tahové diagramy polymerů [6]</i> .....  | 15 |
| <i>Obr. 5. Princip zkoušky dle Brinella [10]</i> .....   | 17 |
| <i>Obr. 6. Schéma přístroje k měření tvrdosti podle Brinella [11]</i> .....  | 18 |
| <i>Obr. 7. Průběh zkušebního zatížení pro metodu dle Brinella [12]</i> .....   | 19 |
| <i>Obr. 8. Schéma přístroje na měření tvrdosti dle Rockwella [15]</i> .....  | 21 |
| <i>Obr. 9. Princip zkoušky dle Rockwella [16]</i> .....  | 21 |
| <i>Obr. 10. Průběh zkušebního zatížení pro Rockwellovu metodu [12]</i> .....   | 22 |
| <i>Obr. 11. Princip zkoušky dle Vickerse [18]</i> .....  | 25 |
| <i>Obr. 12. Schéma přístroje na měření tvrdosti dle Vickerse [17]</i> .....  | 25 |
| <i>Obr. 13. Průběh zkušebního zatížení pro Vickersovu metodu [12]</i> .....  | 26 |
| <i>Obr. 14. Typy hrotů metody Shore [35]</i> .....   | 28 |
| <i>Obr. 15. Přístroj na měření tvrdosti Shore [36]</i> .....   | 28 |
| <i>Obr. 16. Schéma značení tvrdosti Shore [14]</i> .....   | 29 |
| <i>Obr. 17. Přístroj na měření tvrdosti IRHD [36]</i> .....  | 30 |
| <i>Obr. 18. Charpyho kladivo [20]</i> .....  | 31 |
| <i>Obr. 19. Tvar zkušebního tělesa pro Charpyho metodu [21]</i> .....  | 32 |
| <i>Obr. 20. Monomer a polymer</i> .....  | 34 |
| <i>Obr. 21. Rozdělení polymerů</i> .....   | 35 |
| <i>Obr. 22. Typy makromolekulárních řetězců: a) lineární, b) rozvětvený, c) zesíťované,<br/>d) prostorově zesíťované [3]</i> ..... | 36 |
| <i>Obr. 23. Statický kopolymer</i> .....   | 37 |
| <i>Obr. 24. Alternující kopolymer</i> .....  | 37 |
| <i>Obr. 25. Blokovaný kopolymer</i> .....  | 37 |
| <i>Obr. 26. Roubovaný kopolymer</i> .....  | 37 |
| <i>Obr. 27. Rozdělení plastů podle použití [25]</i> .....  | 38 |
| <i>Obr. 28. Chemický vzorec polykarbonátu [32]</i> .....   | 38 |
| <i>Obr. 29. Vrstvy kompaktního disku [33]</i> .....  | 39 |
| <i>Obr. 30. Vstřikovací cyklus [26]</i> .....  | 40 |
| <i>Obr. 31. Schéma vstřikovacího stroje [27]</i> .....   | 41 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Obr. 32. Schéma vstřikovací formy [28]</i> .....  | 42 |
| <i>Obr. 33. Materiálový list Calibre</i> .....   | 45 |
| <i>Obr. 34. Materiálový list Makrolon 2207_1</i> .....   | 46 |
| <i>Obr. 35. Materiálový list Makrolon 2207_2</i> .....   | 47 |
| <i>Obr. 36. Materiálový list Makrolon 2207_3</i> .....   | 48 |
| <i>Obr. 37. Materiálový list Nirion</i> .....  | 49 |
| <i>Obr. 38. Materiálový list Makrolon R30</i> .....  | 50 |
| <i>Obr. 39. Vzhledové porovnání typů polykarbonátu – zleva: Calibre, Makrolon 2207,<br/>Nirion, Makrolon R30</i> ..... | 50 |
| <i>Obr. 40. Zkouška tahem</i> .....  | 53 |
| <i>Obr. 41. Zkušební vzorek</i> .....  | 53 |
| <i>Obr. 42. Porovnání meze pevnosti v tahu</i> .....   | 54 |
| <i>Obr. 43. Porovnání modulu pružnosti</i> .....   | 54 |
| <i>Obr. 44. Porovnání poměrného prodloužení</i> .....  | 55 |
| <i>Obr. 45. Tvrdoměr typu Shore D</i> .....  | 56 |
| <i>Obr. 46. Porovnání tvrdosti metodou Shore D</i> .....   | 56 |
| <i>Obr. 47. Tvrdoměr typu IRHD</i> .....   | 57 |
| <i>Obr. 48. Porovnání tvrdosti metodou IRHD</i> .....  | 58 |
| <i>Obr. 49. Charpyho kladivo</i> .....   | 59 |
| <i>Obr. 50. Zkušební vzorek opatřený V – vrubem</i> .....  | 59 |
| <i>Obr. 51. Porovnání síly potřebné k přeražení vzorku</i> .....   | 60 |
| <i>Obr. 52. Porovnání vrubové houževnatosti</i> .....  | 60 |

**SEZNAM TABULEK**

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tab. 1. Stupnice tvrdosti podle Rockwella [15].....</i> | <i>23</i> |
| <i>Tab. 2. Druhy měření podle Vickerse [17] .....</i>      | <i>27</i> |
| <i>Tab. 3. Vybrané vlastnosti polykarbonátu [29] .....</i> | <i>39</i> |
| <i>Tab. 4. Nastavení vstřikovacích podmínek .....</i>      | <i>51</i> |