

## 1.5 Ostatní zkoušky

Aby bylo možné využít výše uvedené nedestruktivní metody ke kontrole reálných součástí ve výrobním procesu, **je třeba nejprve navázat parametry těchto NDT zkoušek na konkrétní vlastnosti materiálu**. Tyto vlastnosti (tvrdost, pevnost...) je třeba získat pomocí klasických, převážně destruktivních metod na referenčních vzorcích. V této kapitole jsou stručně popsány metody, které byly pro zjištění potřebných vlastností použity v experimentu a nejsou uvedeny v kap. 1.6. Jsou zde především popsány výpočtové vztahy a grafické závislosti, na něž se experimentální část odkazuje.

### 1.5.1 Zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti

#### *Zkouška tvrdosti podle Vickerse (ČSN 42 0374)*

Tvrdost podle Vickerse [HV] se zjišťuje vtlačováním diamantového čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu  $136^\circ$  rovnoměrně se zvyšující silou  $F$  [N] po dobu  $t$  [s] do zkušební vzorku nebo zkoušené součásti. Měřená plocha by měla být lesklá a rovná, aby bylo docíleno co největší přesnosti. Měřítkem tvrdosti je střední délka úhlopříček vtisku po odlehčení zatížení  $u$  [mm], které se odečítají pod mikroskopem.

Tvrdost podle Vickerse se pak učuje jako poměr zátěžující síly a plochy vtisku:

$$HV = \frac{1,854F}{u^2} [kp \cdot mm^{-2}] \quad (1.5.1.2)$$

Pro praktickou potřebu jsou sestaveny tabulky, ve kterých lze podle úhlopříčky vtisku a velikosti použité síly odpovídající tvrdost odečíst. [12], [54]

Zkušební zátěžující síla bývá v rozsahu od 10 do 1000 N. Doba zatížení se volí od 10 do 180 s. Použité zatížení se píše do označení, např. HV<sub>30</sub> (294 N, pro toto běžné zkušební zatížení a dobu od 10 do 15 s se pak používá označení pouze HV). Metodu měření tvrdosti podle Vickerse **lze použít pro všechny tvrdosti**. Metoda je **velmi přesná** a je minimálně závislá na zatížení. Využívá se tedy i pro měření tzv. mikrotvrdosti (viz níže). Pro kontrolu bulkové tvrdosti (v experimentu HV<sub>30</sub>) se používá tzv. **diatestorů** - obraz čtvercového vtisku je na nich promítán ve zvětšeném měřítku na matnici. To umožňuje rychlé odečtení délky úhlopříčky  $u$ . [12], [54]

#### *Měření mikrotvrdosti*

Zkouškou mikrotvrdosti se rozumí **měření tvrdosti při velmi malých zatíženích**. Za hranici mezi makro a mikrotvrdostí se považuje zatížení 19,8 N. Mikrotvrdost **nelze měřit obvyklými tvrdoměry**, neboť **vyžaduje nesrovnatelně větší přesnost** jak při zatěžování, tak i při proměřování úhlopříček vtisku. Nejpresnější je přímé zatěžování závažím, k proměřování vtisku slouží přesná optika. Pro měření mikrotvrdosti jsou tedy využívány mikrotvrdoměry, jež jsou v podstatě kombinací mikroskopu s vnikacím tělískem a zátěžovacím mechanismem (nejznámější konstrukcí je tzv. Hanemannův mikrotvrdoměr). Pro zkoušky mikrotvrdosti jsou použitelné **jedině vnikací metody s diamantovým indentorem** - podle Vickerse, Knoop a Berkoviche.

Odpovídající mikrotvrdość se vypočítá ze vztahu:

$$HV = \frac{0,189F}{u^2} [kp.mm^{-2}] \quad (1.5.1.3)$$

Podle použitého zatížení se mikrotvrdość označuje např.  $HV_{0,05}$  ( $F=0,49 \text{ N} = 50\text{g}$ ). Automatizované přístroje pak hodnotu mikrotvrdości stanovují z indentační křivky (hloubka průniku-zatížení indentoru) – z hloubky průniku se určí tzv. dynamická tvrdość. [57]

## 1.5.2 Zkoušky pevnosti

### **Zkouška tahem (ČSN 42 0310)**

Zkouška tahem spočívá v deformaci zkušební tyče tahovým zatížením na univerzálním trhačím stroji, většinou do přetržení. Obvykle se zkouší při okolní teplotě v rozmezí od 10 do 35 °C. Z výsledků jsou stanoveny tzv. napěťové a deformační charakteristiky – čtyři základní normované mechanické vlastnosti:

- Smluvní mez pevnosti v tahu  $R_m$  [MPa] – smluvní napětí, odpovídající největšímu zatížení  $F_{max}=F_m$  které předchází porušení zkušební tyče.
- Smluvní mez kluzu v tahu  $R_e$  [MPa] nebo  $R_{p0,2}$  [MPa] – nejmenší napětí, které způsobí rozvoj výrazných plastických deformací. Charakterizuje přechod mezi elastickou a elasticko-plastickou oblastí zatěžovací křivky. V tahovém diagram  $F-\Delta L$  ( $R-\varepsilon$ ) se projevuje formou buď výraznou (houževnaté materiály –  $R_e$ ,  $R_{eH}$ ,  $R_{eD}$ ) nebo nevýraznou (křehké materiály –  $R_{p0,2}$ ).
- Tažnost  $A_x$  [%] – poměrná trvalá délková deformace, vyjádřená v %.
- Kontrakce  $Z$  [%] – největší trvalé zúžení průměru, změřené po přetržení v místě lomu, vyjádřeno v %.

Napěťovými charakteristikami jsou mez pevnosti a mez kluzu, deformačními charakteristikami tažnost a kontrakce. Výpočet z výchozích a naměřených parametrů:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa] \quad (1.5.2.1)$$

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [MPa] \quad (1.5.2.2)$$

$$A = \varepsilon_u = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (1.5.2.3)$$

$$Z = \psi_u = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (1.5.2.4)$$

Kde je:

- $F_m$  síla na mezi pevnosti [N]
- $F_e$  síla na mezi kluzu [N]
- $S_0$  počáteční plocha průřezu zkušební tyče [mm<sup>2</sup>]
- $S$  plocha průřezu zkušební tyče po přetržení [mm<sup>2</sup>]
- $L_0$  počáteční délka zkušební tyče [mm]
- $L_u$  délka zkušební tyče po přetržení [mm]

Zkušební tyče pro zkoušku tahem mohou být ploché nebo kruhové, s válcovou nebo závitovou hlavou, krátké nebo dlouhé.

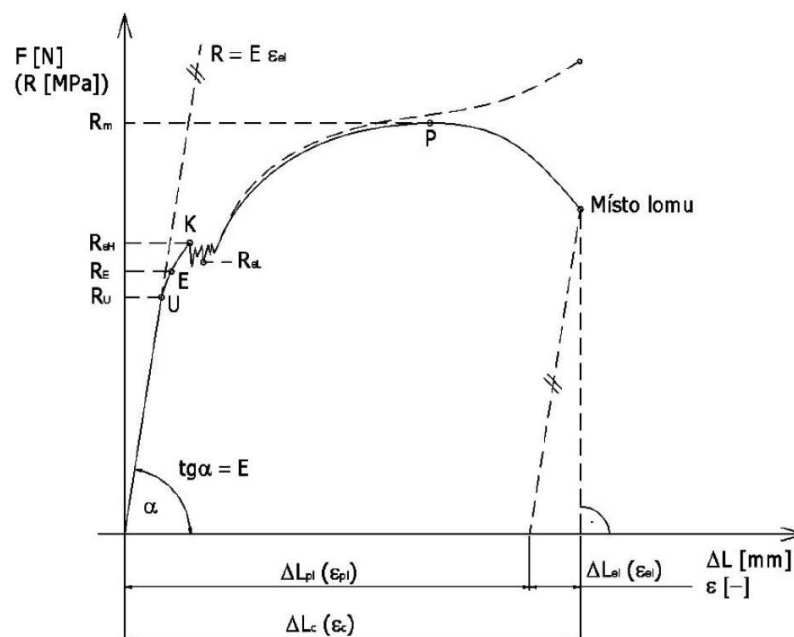
Diagramy ze zkoušky tahem jsou tři – pracovní, smluvní a skutečný. Pracovní diagram je diagram, který vykresluje zkušební zařízení v průběhu zkoušky. Jedná se o závislost absolutního prodloužení měřené délky zkušebního tělesa na zátěžné síle. Smluvní diagram je závislostí smluvního napětí na poměrném prodloužení. Skutečný diagram je diagram závislosti skutečného napětí na logaritmickém prodloužení.

$$\bar{R} = \frac{F}{S} [\text{MPa}] \quad (1.5.2.5) \quad \bar{\epsilon} = \ln \frac{L}{L_0} [-] \quad (1.5.2.6)$$

Kde je:

- $\bar{R}$  skutečné napětí
- $F$  skutečná (okamžitá) síla
- $S$  skutečný (okamžitý) průřez zkušební tyče
- $\bar{\epsilon}$  logaritmické prodloužení
- $L$  skutečná (okamžitá) délka zkušební tyče
- $L_0$  počáteční délka zkušební tyče

[12], [51], [57]



Obr. 1.5.2.1: Diagram zkoušky tahem (kombinovaný). [57]

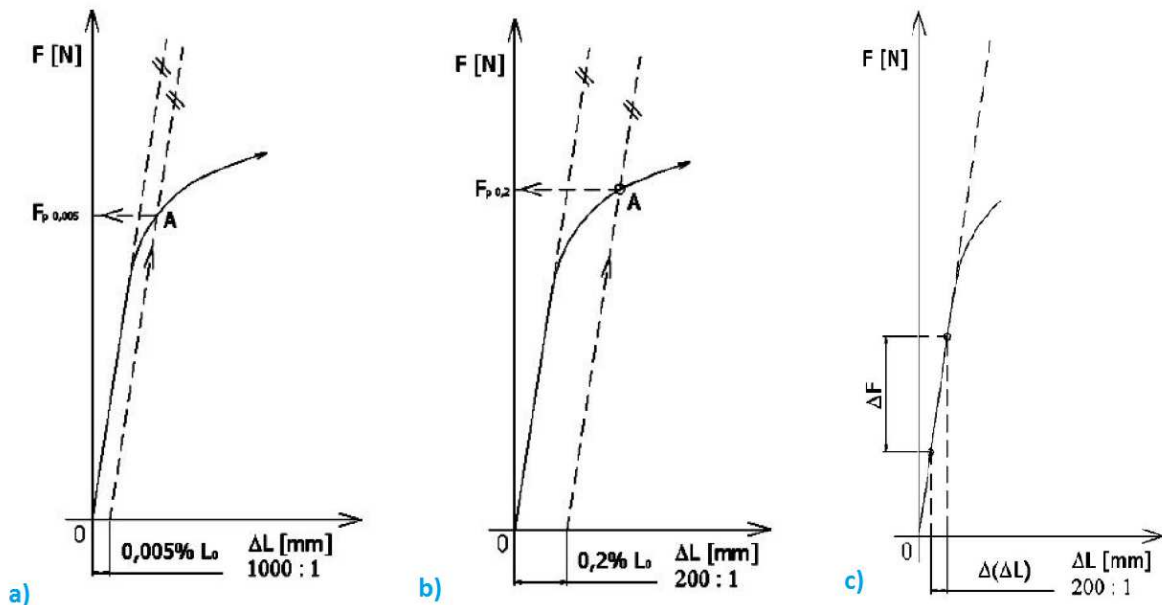
Pro měření malých deformací, většinou při určování smluvní meze pružnosti  $Rp_{0,005}$  [MPa], smluvní meze kluzu  $Rp_{0,2}$  či modulu pružnosti v tahu  $E$  [MPa] je nutné využít tzv. průtahoměrů (extenzometrů). Jsou to přesné přístroje, které se upínají přímo na zkušební tyč (mechanické) nebo využívají vzdáleného měření pomocí laserového paprsku a zaznamenávají okamžitou deformaci, která vzniká při jejím zatěžování. Smluvní mez pružnosti  $Rp_{0,005}$  je napětí, které způsobí trvalou deformaci o velikosti 0,005%  $L_0$ . Smluvní mez kluzu  $Rp_{0,2}$  je napětí, které způsobí trvalou deformaci o velikosti 0,2%  $L_0$ . Modul pružnosti v tahu  $E$  geometricky odpovídá směrnici přímkové části diagramu. Tento počáteční přímkový úsek diagramu přísluší pružné deformaci a vyjadřuje úměrnost mezi napětím a deformací podle Hookova zákona  $R=E*\epsilon_{el}$  [MPa]. [12], [51], [57]

$$Rp_{0,005} = \frac{F_{p0,005}}{S_0} [MPa] \quad (1.5.2.7) \quad Rp_{0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [MPa] \quad (1.5.2.8)$$

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta R}{\Delta \epsilon_{el}} = \frac{\frac{\Delta F}{S_0}}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} [MPa] \quad (1.5.2.9)$$

Kde je:

$F_{p0,005}$	síla na mezi pružnosti $Rp_{0,005}$
$F_{p0,02}$	síla na mezi kluzu $Rp_{0,2}$
$\Delta L$	změna délky zkušební tyče
$\Delta F$	změna zatěžující síly
$\Delta R$	změna napětí
$\Delta \epsilon_{el}$	změna elastické deformace



**Obr. 1.5.2.2:** Určení a) smluvní meze pružnosti  $Rp_{0,005}$ , b) smluvní meze kluzu  $Rp_{0,2}$  a c) modulu pružnosti v tahu  $E$ . [57]

## Zkouška ohybem (ČSN 42 0361)

Zkouška ohybem se používá především při zkoušení křehkých materiálů, zejména litiny, stavebních hmot aj. U houževnatých, tvárných materiálů nemá význam, neboť k porušení zkušební tělesa ohybem nedojde – používá se pouze jako zkouška technologická.

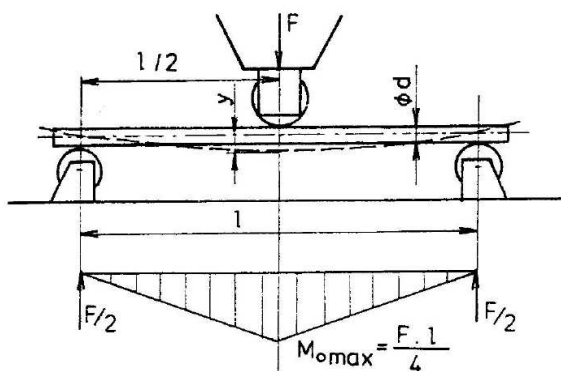
Cílem zkoušky je zjistit pevnost v ohybu  $R_{m0}$ , která se vypočítává z maximálního ohybového momentu  $M_{o\max}$  a z průřezového modulu v ohybu  $W_o$ . Charakteristikou houževnatosti v ohybu je maximální průhyb  $y_{\max}$ , který se měří v okamžiku porušení tyče. K tomuto porušení dochází při síle  $F_{\max}$ . [12], [52], [57]

$$R_{m0} = \frac{M_{o\max}}{W_o} [MPa] \quad (1.5.2.10) \quad M_{o\max} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} [N \cdot mm] \quad (1.5.2.11)$$

$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{a^3}{6} = \frac{b \cdot h^2}{6} [mm^3] \quad (1.5.2.12)$$

Kde je:

$R_{m0}$	mez pevnosti v ohybu
$M_{o\max}$	maximální ohybový moment
$W_o$	modul průřezu v ohybu
$F_{\max}$	maximální ohybová síla
$l$	vzdálenost podpor
$d, a, b, h$	rozměry průřezů zkušebních tyčí

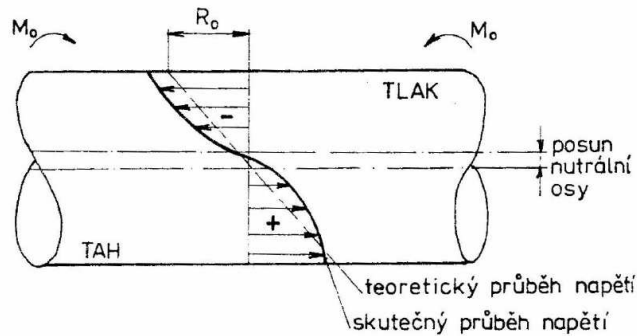


**Obr. 1.5.2.3:** Schéma zatěžování při zkoušce ohybem. [57]

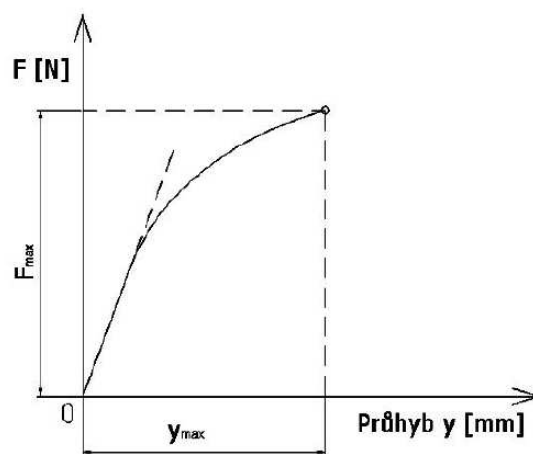
V oblasti platnosti zákona úměrnosti je možno z hodnoty průhybu vypočítat modul pružnosti v tahu  $E$ :

$$E = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot J \cdot y} [MPa] \quad (1.5.2.13), \text{ kde}$$

$J$  je moment setrvačnosti namáhaného průřezu v  $[mm^4]$  a  $y$  je průhyb v  $[mm]$ . [12]



**Obr.1.5.2.4:** Rozdělení napětí v průřezu tyče nad mezí úměrnosti pro materiál nestejných vlastností v tahu a tlaku. [57]



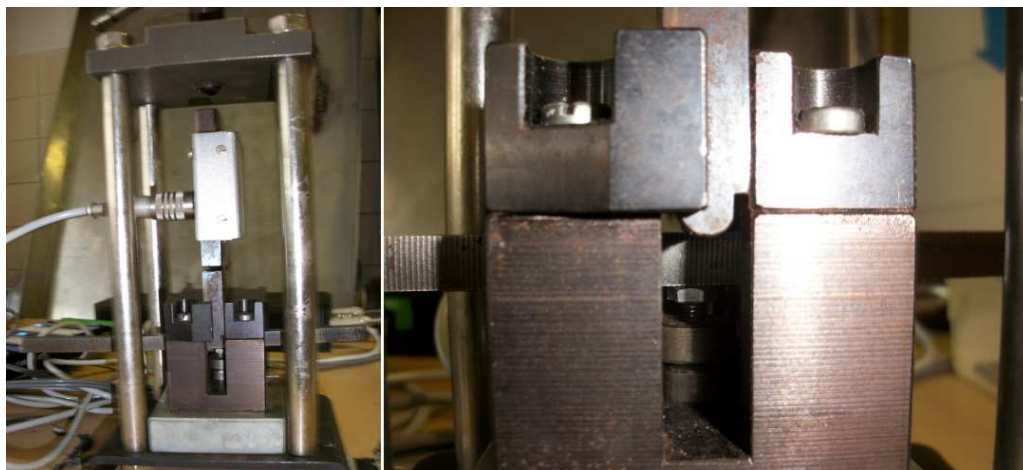
**Obr.1.5.2.5:** Pracovní diagram zkoušky ohybem (šedá litina). [57]

### **Mikroohybová zkouška**

Mikroohybová zkouška ve srovnání se standardní ohybovou zkouškou využívá podstatně menší vzorek materiálu. K měření se využívá speciální přípravku. Vzorek obvykle obdélníkového průřezu je umístěn na tvrdých podložkách, které rozkládají tlak a brání boření vzorku do podpor pod podložkami. [53]

Zatěžovací trn – ohybník – působí na vzorek uprostřed silou  $P$ , vyvozovanou buď univerzálním trhacím strojem nebo jiným zdrojem rovnoměrně rostoucí síly (lis, svěrák). Tenzometry přilepen na ohybníku snímají zatěžovací sílu a tenzometry na ocelové planžetě pod průhybovým čípkem snímají průhyb. Elektronické výstupy přípravku pro mikroohybovou zkoušku jsou přes A/D převodníky propojeny s počítačem. Data ve formě excelovské tabulky pak umožňují další zpracování – grafický záznam, výpočty modulu pružnosti a dalších mezí materiálu, vč. derivací k získání skutečných fyzikálních mezních stavů. [53]

Vzdálenost podpor  $l$  je 10, 25 nebo 40 mm a maximální průřez vzorku  $b \cdot h$  je omezen napětíovými poměry ( $\sigma_{red.} \cong \sigma_{oh}$ ) a maximální zatížitelností ohybníku (cca 6,5 kN). Maximální průhyb se pohybuje kolem 1,5 mm. Rozměry přípravku jsou malé - 60x60x180mm – viz obr.1.5.2.6.



**Obr.1.5.2.6:** Přípravek pro mikroohybovou zkoušku.

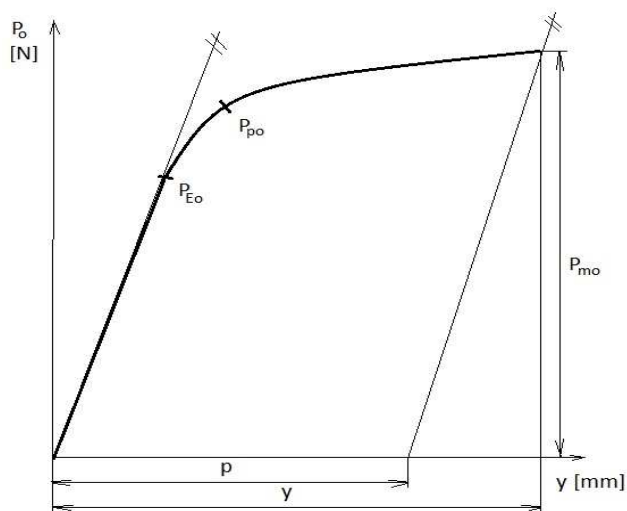
Parametry, jež lze z grafického záznamu zkoušky určit jsou:

- mez pevnosti v ohybu  $R_{mo}$
- mez kluzu v ohybu  $R_{Po}$ , případně i mez úměrnosti  $R_{Eo}$  u tvárných litin
- podíl nelineárního a lineárního průhybu  $y_p$

$$R_{mo} = \frac{M_{o\max}}{W_o} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{mo} \cdot l}{b \cdot h^2} [MPa] \quad (1.5.2.14) \quad y_p = \frac{p}{y-p} [-] \quad (1.5.2.15)$$

Kde je:

Momax	maximální ohybový moment
Wo	modul průřezu v ohybu
Pmo	síla na mezi pevnosti v ohybu
l	vzdálenost podpor
b,h	rozměry průřezu vzorku
p	lineární (pružný) průhyb
y	celkový průhyb



**Obr.1.5.2.7:** Vyhodnocení grafického záznamu mikroohybové zkoušky. [53]

Hodnoty  $R_{po}$  a  $y_p$  nejsou zatím obecně definovány, pro tento případ je  $R_{po}$  definována jako napětí odpovídající bodu záznamu s maximální křivostí – představuje mezní stav přechodu z převážně pružných deformací materiálu vzorku při namáhání. Šedé litiny běžných jakostí nemají tento stav běžně vyhodnotitelný. Hodnota  $y_p$  je do jisté míry obdobou tažnosti A u zkoušky pevnosti v tahu. Nezávisí na absolutních rozměrech vzorku (v rozsahu provedených zkoušek). [53]

**Tab.1.5.2.1:** Vztah  $R_m$  a  $y_p$  základních litin – střední hodnoty, směrodatné odchytky byly získány z desítek měření. [53]

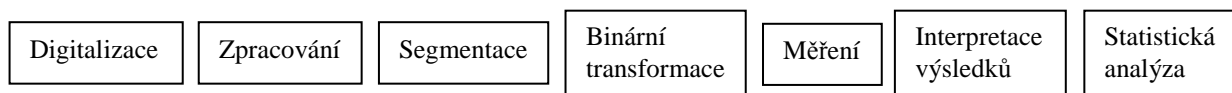
$R_m=0,51R_{m0}$	$R_{m0}$ [MPa]	$S_{R_{m0}}$	$y_p$ [-]	$S_{y_p}$
Tvárná litina feritickoperlitická	1140	100	6,6	1,5
Litina s červíkovitým grafitem - ferit	820	41	1,46	0,21
Šedá litina střední jakosti	438	54	0,51	0,16
Temperovaná litina, ferit-perlit	627	50	0,9	0,06

### 1.5.3 Studium mikrostruktury

Ke studiu mikrostruktury byly v experimentální části využity metody optické a rastrovací elektronové mikroskopie. Základní principy zobrazovacích metod jsou všeobecně známy a jejich popis nemá valný význam coby podklad k experimentální části. Jsou zde proto uvedeny jen některé důležité informace o provedených analýzách pro lepší pochopení jejich výsledků.

#### **Obrazová analýza snímků z optické mikroskopie**

Obrazy z mikroskopu nebo z makrooptiky snímány CCD kamerou mohou být archivovány, softwarově upravovány, proměřovány a dále matematicky zpracovávány. Možnosti optické mikroskopie totiž nespočívají pouze v akvizici obrazu, ale i v jeho zpracování, při němž je možné získat řadu dalších, velmi cenných informací o struktuře a vlastnostech materiálů.



**Obr.1.5.3.1:** Schéma postupu při obrazové analýze. [58]

**Obrazová analýza** umožňuje nahrazení subjektivního pozorování obrazu pomocí objektivních charakteristik. Schéma postupu při obrazové analýze je na obr.1.5.3.1. Zpracování obrazové informace má za hlavní cíl odstranění šumů a extrakci typických rysů charakterizujících obraz. Klíčovým krokem analýzy obrazu je segmentace, při které jsou v obraze selektovány objekty určené k hodnocení, teprve poté je možné provést měření a stanovit požadované morfometrické nebo denzitometrické vlastnosti objektů např. plochu, obvod, délku, kulatost objektů nebo intenzitu zvolené barevné složky. Výsledkem binární transformace je binární obraz jako pole dat obsahující pouze nulu (bílá) nebo jedničku (černá). Element tohoto pole se nazývá pixel. Zpracování binárních obrazů je úzce spjato s matematickou morfologií. Objekty jsou tvořeny spojením pixelů jednoho typu (černé) a pozadí tvoří množina doplňků (bílé). Pro definici spojení pixelů se obvykle používá technika nejbližších sousedů, tj. připouští se spojení přes strany i hrany (rohy). Následným krokem je měření charakteristických rysů objektů, při němž se obvykle používá individuálních a texturálních charakteristik. [58], [59]



## ***Studium mikrostruktury pomocí rastrovací elektronové mikroskopie***

Ke studiu detailní morfologie jehlic feritu při různých variantách TZ bylo využito především **zobrazení pomocí sekundárních elektronů**. Sekundární elektrony mají energii do cca 50eV a jsou emitovány z hloubky do cca 50 nm pod povrchem vzorku. Bodové rozlišení na zobrazeních v sekundárních elektronech je blízké průměru primárního svazku elektronů. Hodnota bodového rozlišení v moderních SEM s autoemisní tryskou se v současné době pohybuje na úrovni cca 1nm. Kontrast zobrazení v sekundárních elektronech je silně ovlivňován úhlem náklonu povrchu vzorku k primárnímu svazku elektronů. Zobrazení v sekundárních elektronech je tedy především obrazem topografie povrchu. Charakteristickou vlastností tohoto zobrazení je velká hloubka ostrosti. [60], [61]