

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH  
STROJNÍCKA FAKULTA**



**Strojnícka fakulta**

**ZÁKLADY MATERIÁLOVÉHO INŽINIERSTVA**  
**Návody na cvičenia**

**prof. Ing. Janette BREZINOVÁ, PhD.**  
**prof. Ing. Ján VIŇÁŠ, PhD.**  
**doc. Ing. Dagmar DRAGANOVSKÁ, PhD.**  
**doc. Ing. Anna GUZANOVÁ, PhD.**

**EDÍCIA ŠTUDIJNEJ LITERATÚRY**

**Košice 2020**

Recenzenti: prof. Ing. B. Hadzima, PhD., Žilinská univerzita v Žiline, Výskumné centrum, SR  
doc. Ing. P. Mohyla, PhD., VŠB - Technická univerzita Ostrava, Česká republika

## Obsah

|                                                                               | Strana |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------|
| ÚVOD                                                                          | 4      |
| TÉMA 1 Kryštalická stavba kovov                                               | 5      |
| TÉMA 2 Rozdelenie a označovanie kovov a zliatin                               | 12     |
| TÉMA 3 Štúdium makroštruktúry kovov                                           | 24     |
| TÉMA 4 Štúdium mikroštruktúry kovov. Svetelná mikroskopia                     | 35     |
| TÉMA 5 Zostrojenie rovnovážnych diagramov kovových sústav                     | 45     |
| TÉMA 6 Metastabilný rovnovážny diagram Fe – Fe <sub>3</sub> C                 | 54     |
| TÉMA 7 Mechanické skúšky statické - skúška ťahom                              | 63     |
| TÉMA 8 Mechanické skúšky statické - skúška v tlaku, ohybe, krútení a v strihu | 71     |
| TÉMA 9 Mechanické skúšky dynamické - skúška rázom v ohybe                     | 76     |
| TÉMA 10 Mechanické skúšky statické - skúšky tvrdosti materiálov               | 82     |
| TÉMA 11 Skúška únavy materiálov                                               | 91     |
| TÉMA 12 Technologické skúšky materiálov                                       | 103    |
| TÉMA 13 Hodnotenie zvariteľnosti a spájkovateľnosti materiálov                | 120    |
| Literatúra                                                                    | 130    |

## Úvod

Skriptum Základy materiálového inžinierstva – návody na cvičenia je určené ako učebná pomôcka pre poslucháčov bakalárskeho štúdia Strojníckej fakulty TU v Košiciach.

Predmet poskytuje poslucháčom fakulty rôznych študijných odborov prvého ročníka bakalárskeho štúdia ucelený prehľad v danej problematike a slúži tiež pre poslucháčov materiálovo a technologicky zameraných študijných odborov.

Cieľom predmetu je, aby študent získal základný prehľad o štruktúre materiálov, používaných materiáloch v technickej praxi a skúšaní ich vlastností. Predmet vychádza zo štúdia vnútornej stavby materiálov a na jej základoch sú odvodzované vlastnosti jednotlivých materiálových skupín. To umožňuje konštrukciu vzťahov medzi štruktúrou a vlastnosťami materiálov, medzi štruktúrou a technológiou spracovania materiálov. Bez poznania týchto súvislostí v súčasnej dobe nie je možné vyrábať konkurencieschopné materiály, prvovýrobky a výrobky.

Cvičenia sú súčasťou učebného plánu uvedeného predmetu a majú čiastočne doplniť prednášky o niektoré nové učivo, precvičiť potrebnú časť odprednášanej látky a naučiť poslucháčov prakticky aplikovať teoretické vedomosti. Dúfame, že skriptum napomôže poslucháčom pri štúdiu a radi uvítame rady a pripomienky, vedúce k zlepšeniu obsahu tejto práce.

Na záver sa nám dovoľte poďakovať recenzentom za dôkladne preštudovanie rukopisu a ich cenné pripomienky k jeho obsahu i forme.

Skriptum bolo publikované s podporou projektov VEGA 1/0154/19, VEGA 1/0497/20 a KEGA 001STU-4/2019.

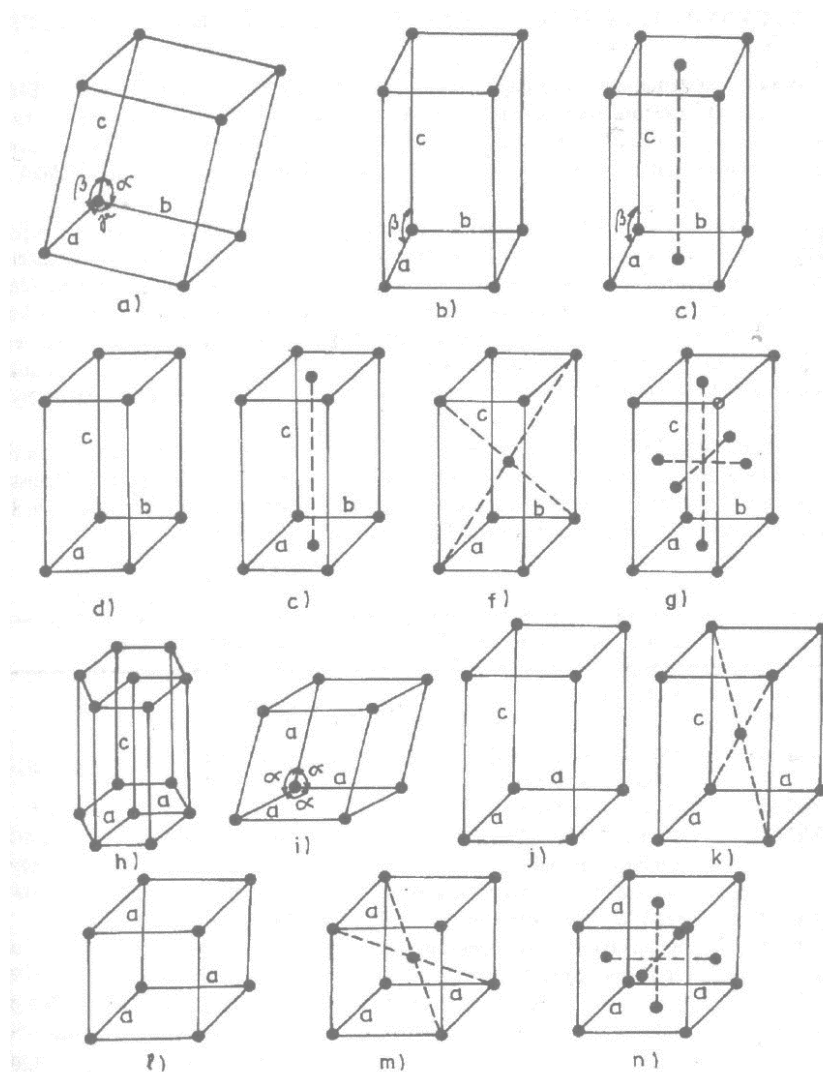
Košice, december 2020

Autori

## Téma č. 1: KRYŠTALICKÁ STAVBA KOVOV

Z hľadiska usporiadanosti je možné rozdeliť súbory atómov na:

- *neusporiadané súbory atómov* – vyplňujú priestor bez akéhokoľvek poriadku čo sa týka ich polohy aj ich vzájomnej vzdialenosti (napr. inertný plyn neon alebo argón), v priestore sa pohybujú náhodne,
- *súbory usporiadané na krátku vzdialenosť* – atómy zaujímajú vo svojom bezprostrednom okolí presnú geometrickú polohu, vytvárajú molekulu (napr. vodná para – každá molekula vykazuje svoju typickú geometriu avšak navzájom nemajú skoorinované vzájomné polohy a chovajú sa ako plyn),



Obr.1.1 Bravaisových 14 mriežok

- a) triklinická jednoduchá, b) monoklinická jednoduchá, c) monoklinická bazálne centrovaná, d) ortorombická jednoduchá, e) ortorombická bazálne centrovaná, f) ortorombická priestorovo centrovaná, g) ortorombická plošne centrovaná, h) hexagonálna, i) romboedrická, j) tetragonálna jednoduchá, k) tetragonálna priestorovo centrovaná, l) kubická jednoduchá, m) kubická priestorovo centrovaná, n) kubická plošne centrovaná

- *súbory usporiadané na dlhú vzdialenosť* - umiestnenie atómov alebo molekúl je v prísne vymedzených polohách tak, aby bola zachovaná symetria a pravidelnosť usporiadania do vzdialenosti oveľa väčšej ako je okolie jedného atómu alebo molekuly, čo vedie k tvorbe kryštálov.

Aby bolo možné systematizovať usporiadanie bodov v priestorovej mriežke, odvodil Bravais (1848), že v trojrozmernom priestore existuje reálne iba 14 priestorových mriežok, ktoré sú usporiadané v 7 kryštalografických sústavách, ktorých schematické znázornenie je na obr. 1.1.

Z celkového počtu viac ako 100 prvkov, ktoré sa nachádzajú v prírode má 77 charakter kovov. Kovy sa vyznačujú kovovým leskom, dobrou pevnosťou a tvárnosťou, vysokou elektrickou a tepelnou vodivosťou. Dôležitou vlastnosťou kovov je ich *kryštalická stavba* – častice z ktorých kov pozostáva (atómy - ióny) sú v priestore uložené úplne zákonite v určitých pravidelných priestorových útvarov a tvoria tzv. **kryštalové mriežky**, ktoré sú charakterizované:

- **parametrom mriežky  $a_0(b_0, c_0)$**  – vzdialenosť medzi stredmi atómov v mriežke,
- **koordinačným číslom ( $K$ )** – udáva počet atómov rovnakej a pritom najmenšej vzdialenosti od určitého atómu,
- **elementárnou bunkou** – počet atómov, ktorý pri svojom opakovanom ukladaní v priestore vytvorí daný typ mriežky.
- **faktorom plnenia** ktorý je daný pomerom:

$$\frac{(\text{počet atómov v mriežke}) \times (\text{objem atómu})}{\text{objem mriežky}}$$

Vlastnosti kovov a zliatin súvisia s ich vnútornou stavbou. Technicky významné kovy kryštalizujú najčastejšie v sústave kubickej, tetragonálnej a hexagonálnej a sú to konkrétne nasledujúce kryštalické mriežky:

- a) **Kubická objemovo centrovaná (stereocentrická) -  $K8$** , obr.1.2 a). Má koordinačné číslo  $K8$  a kryštalizujú tak kovy ako Cr, Mo, V, W, Li, Na, K,  $Fe_\alpha$ . Vyznačujú sa horšou tvárnosťou za studena. Základnú mriežku tvorí 9 atómov. Pre mriežku platí:

$$a = b = c, \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

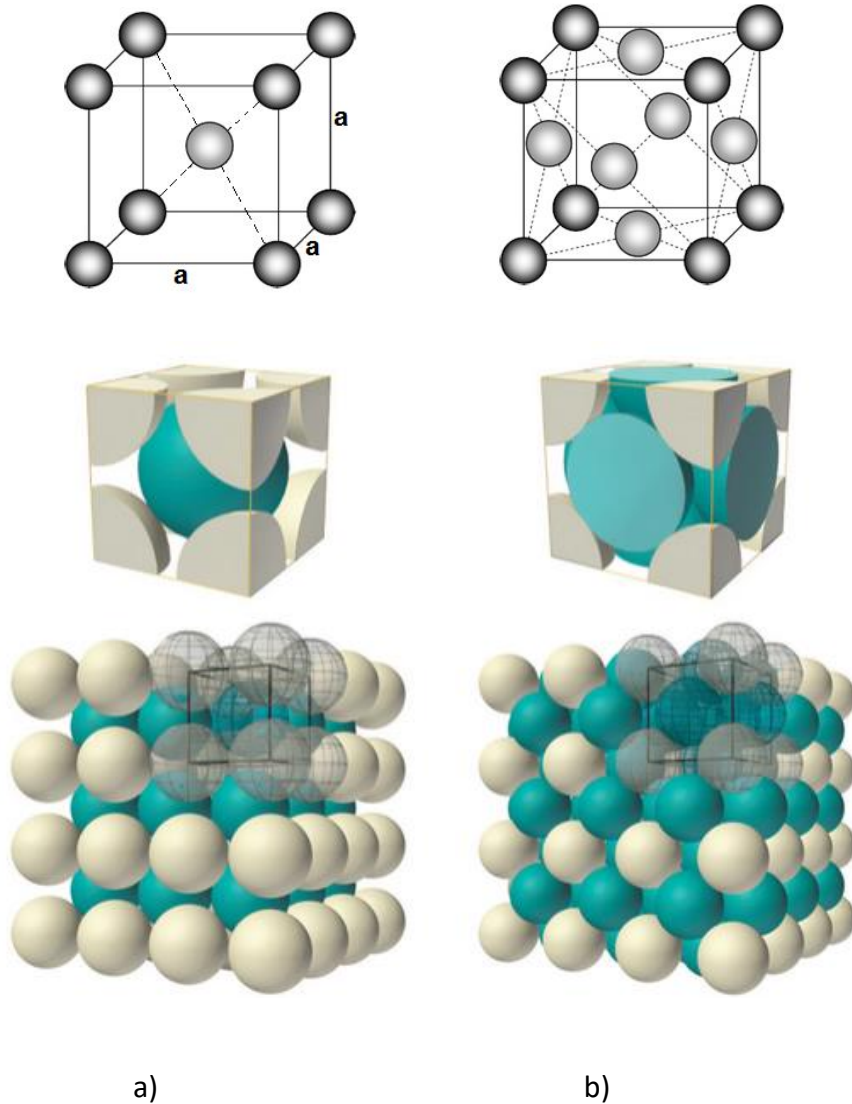
Pre jej označenie sa používajú nasledovné skratky:

- KSC – kubická stereocentrická,
- bcc – body centered cubic (ang.),
- cc – cubic centrée (fr.).

- b) **Kubická plošne centrovaná (planicentrická) -  $K12$** . Základnú mriežku tvorí 14 atómov (obr.1.2 b). Kovy kryštalizujúce v tejto sústave, napr. Al, Cu, Ni, Ag, Pb,  $Fe_\gamma$  sú veľmi dobre tvárne za tepla i za studena.

Pre jej označenie sa používajú skratky ako:

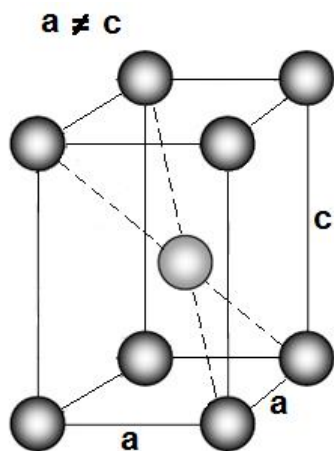
- KPC – kubická planicentrická,
- fcc – face centered cubic (ang.),
- cfc – cubic a faces centrées (fr.).



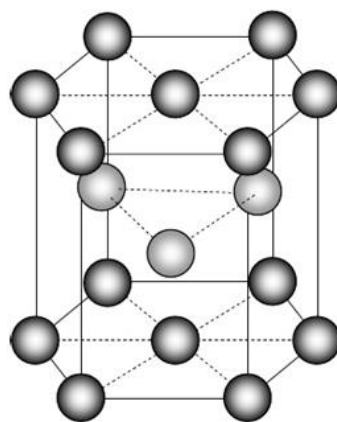
Obr. 1.2 Elementárna bunka mriežky  
a) kubická objemovo centrovaná, b) kubická objemovo centrovaná.

- c) **Tetragonálna objemovo centrovaná mriežka** s koordinačným číslom **T8**. Základnú mriežku tvorí 9 atómov (obr.1.3) a môže vzniknúť aj deformáciou kubickej mriežky. Pomer parametrov  $c/a$  udáva stupeň tetragonality.
- d) **Hexagonálna mriežka** s tesným usporiadaním atómov - **H12**. Základnú mriežku tvorí 17 atómov, obr.1.4. Kovy s jednoduchou hexagonálnou mriežkou majú základnú mriežku tvorenú 14 atómami. Chýbajú 3 atómy v strede výšky  $c$ . Ideálny pomer  $c:a$  v mriežke H12 je 1,633, ale môže byť väčší (napr. Cd – 1,8859) alebo menší (Be – 1,56). Vzhľadom

k obmedzenému počtu sklzových systémov, kovy s touto mriežkou sa vyznačujú nižšou tvárnosťou za studena i tepla. Tak kryštalizujú kovy ako Mg, Be, Co, Ti, Zn, Cd.



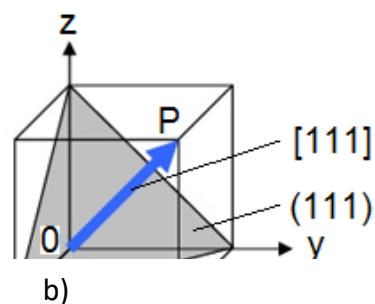
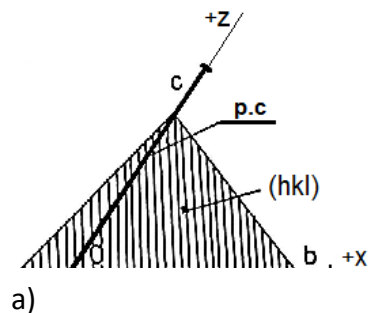
Obr.1.3 Usporiadanie atómov v mriežke T8



Obr.1.4 Usporiadanie atómov v mriežke

Veľký význam pri pozorovaní rôznych javov, prebiehajúcich v kovoch a zliatinách má označovanie rovín a smerov v kryštalickej mriežke. Tieto sú dôležité pre určovanie orientácie kryštálu. Kryštalografickú rovinu si môžeme predstaviť ako myslený rez kryštálovou štruktúrou, vedený uzlovými bodmi v priestorovej mriežke.

K označovaniu rovín a smerov sa používajú **Millerove indexy** ( $hkl$ ). Nech zistená rovina (obr.1.5a) vytína na osiach  $x$ ,  $y$ ,  $z$  úseky  $m.a$ ;  $n.b$ ;  $p.c$ , kde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  sú parametre mriežky, t.j. základné merné jednotky na osiach  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Prevrátené hodnoty čísiel  $m$ ,  $n$ ,  $p$  prevedené na najmenšie celé čísla s rovnakým pomerom udávajú Millerove indexy sledovanej roviny. Ak napr.  $m = 3$ ,  $n = 1$ ,  $p = \infty$ , potom sú prevrátené hodnoty  $1/3$ ,  $1/1$ ,  $1/\infty$  upravené na spoločného menovateľa  $1/3$ ,  $3/3$ ,  $0$  a Millerove indexy ( $hkl$ ) takejto roviny sú  $(130)$ . Index  $h$  patrí osi  $x$ , index  $k$  osi  $y$  a index  $l$  osi  $z$ .



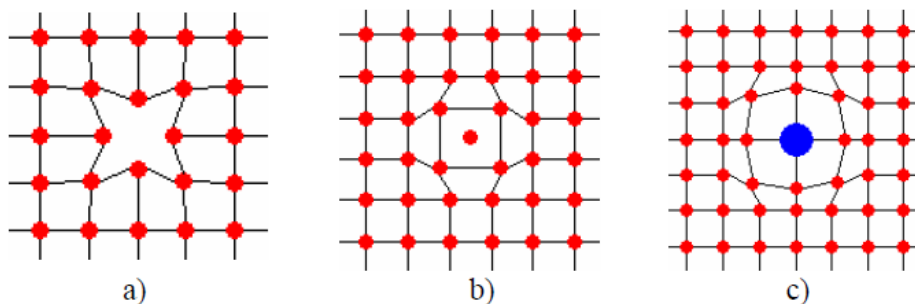
Obr. 1.5 a) Schéma k odvodeniu Millerových indexov kryštalogrickej roviny  
b) Millerové indexy v kubickej mriežke

Indexy v guľatých zátvorkách - (hkl) - predstavujú jednu kryštalografickú rovinu a roviny s ňou rovnobežné. Indexy v zložených zátvorkách - {hkl}- predstavujú súbor kryštalograficky ekvivalentných rovín. Napr. súbor rovín {100} obsahuje roviny (100), ( $\bar{1}00$ ), (010), (0 $\bar{1}$ 0), (001), (00 $\bar{1}$ ), teda steny kubickej mriežky, ktoré majú ekvivalentné vlastnosti. Záporné znamienko nad určitým indexom znamená, že zvolená rovina pretína zodpovedajúcu os na zápornej strane od počiatku súradníc.

**Indexy kryštalografického smeru** [uvw] získame iným spôsobom. Smer je ako lúč, ktorý vychádza z počiatku súradnicového systému a prechádza určitým bodom, napr. P, so súradnicami, ktoré sú násobkami parametrov mriežky. Potom indexy smeru sú vlastne súradnice bodu P (obr.1.5.b), ktorý leží na spojnici s počiatkom súradnicového systému.

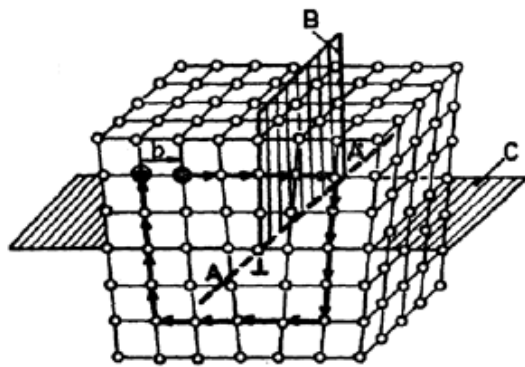
V živote aj v prírode existuje len máločo dokonalé. Výnimkou v tomto smere nie sú ani kryštály, resp. kryštalické látky. Dokonalú, geometricky presne vybudovanú kryštalovú štruktúru má iba ideálny kryštál, avšak skutočný - reálny kryštál má veľké množstvo rozličných nedokonalostí stavby, ktoré nazývame **mriežkové poruchy** a delíme ich najčastejšie podľa veľkosti na:

- **bodové poruchy** (obr.1.6) – sú to najmenšie poruchy veľkosti atómov a patria sem *vakencie* (prázdne, neobsadené uzlové body mriežky), *interstície* (atóm v medziuzlovej polohe) a *cudzí atóm* (nachádzajúci sa v uzlovom bode alebo dutine).

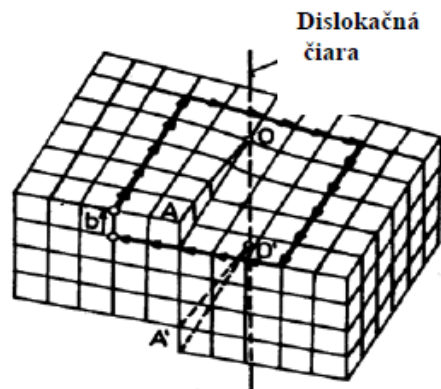


Obr.1.6 Bodové poruchy a) vakencie b) interstície c) cudzí atóm v uzlovom bode

- **čiarové poruchy** (obr.1.7-1.8) – jedná sa o poruchy určitej skupiny atómov, nazývajú sa tiež **dislokácie**. Je pre nich charakteristické, že ich prítomnosť môžeme vzťahovať k určitej myslenej čiare v kryštáli a odtiaľ majú aj svoje označenie. Základnými typmi dislokácií sú *hranová* (medzi atómové roviny bola vložená ďalšia atómová polovina B, koncový rad jej atómov tvorí tzv. dislokačnú čiaru AA', rovina kolmá na rovinu dislokácie obsahujúca dislokačnú čiaru sa nazýva rovina dislokácie C) a *skrutková* (atómy, ktoré sú v okolí určitej priamky – dislokačnej čiary, sú usporiadané do tvaru skrutkovice).

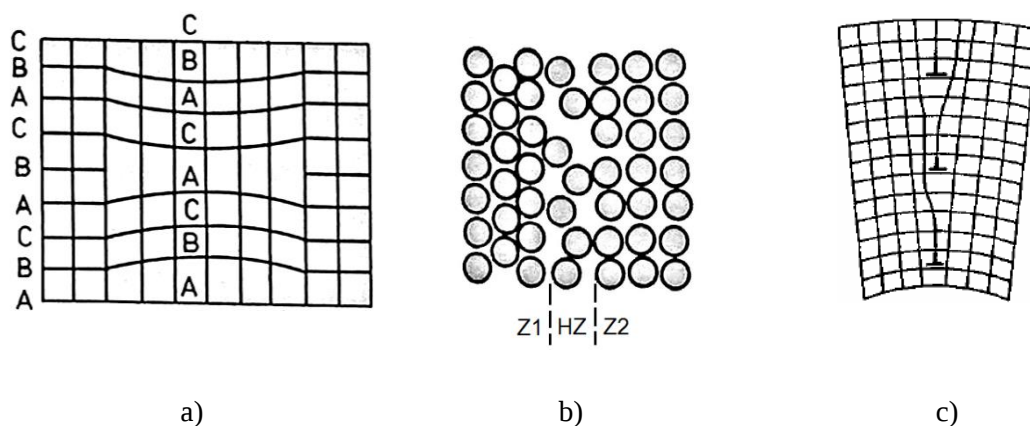


Obr.1.7 Znáozornenie hranovej dislokácie



Obr.1.8 Schéma skrutkovej dislokácie

- **plošné poruchy** (obr.1.9) – jedná sa o nepravidelnosti v kryštalickej stavbe, ktoré sa prejavujú v určitých plochách. Patria sem *chyby vrstvenia* (poruchy vo vrstvení atómových rovín na seba, *hranice zrn* (výrazne porušená pravidelnosť kryštalickej stavby v dôsledku prítomnosti vysokej hustoty dislokácií a vakancií) a *hranice subzrn* (sú zobrazované ako dislokačné steny, t.j. dislokácie sú usporiadané nad sebou)



Obr.1.9 Plošné poruchy: a) chyba vrstvenia v mriežke, b) hranica zrna, c) hranica subzrn

- **priestorové poruchy** – jedná sa o trojrozmerné poruchy o rozmeroch väčších ako je veľkosť atómu, ktoré sa výrazne líšia zložením alebo usporiadaním atómov od základnej stavby kryštálu a výrazne narušujú periodicitu kryštálovej mriežky. Ide napr. o dutiny, póry, precipitáty, zhluky nečistôt a iné.

**Otázky:**

1. Čo je kryštalická stavba kovov ?
2. Ako súvisia vlastnosti kovov s typom kryštalickej mriežky ?
3. Čo je koordinačné číslo ?
4. Na čo sa používajú Millerove indexy ?
5. Ako delíme poruchy kryštalickej stavby kovov (mriežkové poruchy) ?
6. Aké bodové poruchy poznáme ?
7. Čím je charakteristický monokryštál ?
8. Čo je hranica zrna ?
9. Nakreslite bodové poruchy v mriežke.

## Téma č. 2: Rozdelenie a označovanie kovov a zliatin

Kovy a zliatiny kovov sú najpoužívannejšie strojárské materiály. Čisté kovy pre svoju náročnú výrobu a pomerne nízke mechanické vlastnosti majú menšie využitie ako konštrukčný materiál, využívajú sa hlavne ich ďalšie vlastnosti, ako elektrická vodivosť – Al, Cu, elektrický odpor – W, ušľachtilosť v zmysle vysokej koróznej odolnosti – Ag, Au, Pt a pod. Oveľa väčšie využitie na konštrukčné účely majú zliatiny, či už na báze zliatin Fe alebo neželezných kovov. Vzhľadom na veľmi širokú škálu strojárskych materiálov je potrebné stanoviť pravidlá pre ich jednoznačné označovanie, ktoré riadi pravidlá pre ich klasifikáciu pri výrobe, obchodovaní a pri materiálovom dizajne.

*Zliatiny železa* rozdeľujeme (podľa metastabilnej sústavy železo - cementit) na:

- oceľe, t.j. zliatiny železa a uhlíka s obsahom do 2,14 % C (max. rozpustnosť uhlíka v austenite), ktoré je možné ohrevom previesť do oblasti austenitu; sú charakteristické dobrou tvárnosťou a určené predovšetkým na výrobu tvárnených polovýrobov;
- liatiny, t.j. zliatiny železa a uhlíka s obsahom viac ako 2,14 % C, ktoré obsahujú v štruktúre eutektikum (ledeburit) alebo grafit, ktoré prakticky znemožňujú ich tvárnosť, ale zlepšujú tekutosť, preto sú určené na výrobu odliatkov.

### Označovanie ocelí na tvárnenie

Zliatiny železa ako širokospektrálne využívaný materiál sa delí podľa spracovania na materiály tvárnené a materiály určené na odlievanie. Materiály tvárnené tvoria až 96 % celkovej produkcie zliatin železa. Ich označovanie v rámci národnej (STN) i európskej normy (EN) je popísané v tejto kapitole.

### 1. OZNAČOVANIE OCELÍ PODĽA STN

Na obr. 2.1 je schéma rozdelenia a označenia ocelí na tvárnenie podľa STN 42 002. Na obr. 2.2 je uvedená schéma rozdelenia a označenia ocelí na tvárnenie.

Význam 3. a 4. číslice v značke ocelí:

#### *Ocele triedy 10*

- 00 - ocele základnej akosti
- u konštrukčných ocelí charakterizuje približne pevnosť v ťahu  $R_m = XX \times 10$  [MPa]
- u ocelí na výstuž betónových konštrukcií charakterizuje medzu klzu  $R_e$  alebo  $R_{p0,2} = XX \times 10$  [MPa]

#### *Ocele triedy 11*

- u automatových ocelí je tretia číslica 1, štvrtá charakterizuje stredný obsah C v desatinách %

- u konštrukčných ocelí charakterizuje približne pevnosť v ťahu  $R_m = XX \times 10$  [MPa]

#### Ocele triedy 12 až 16

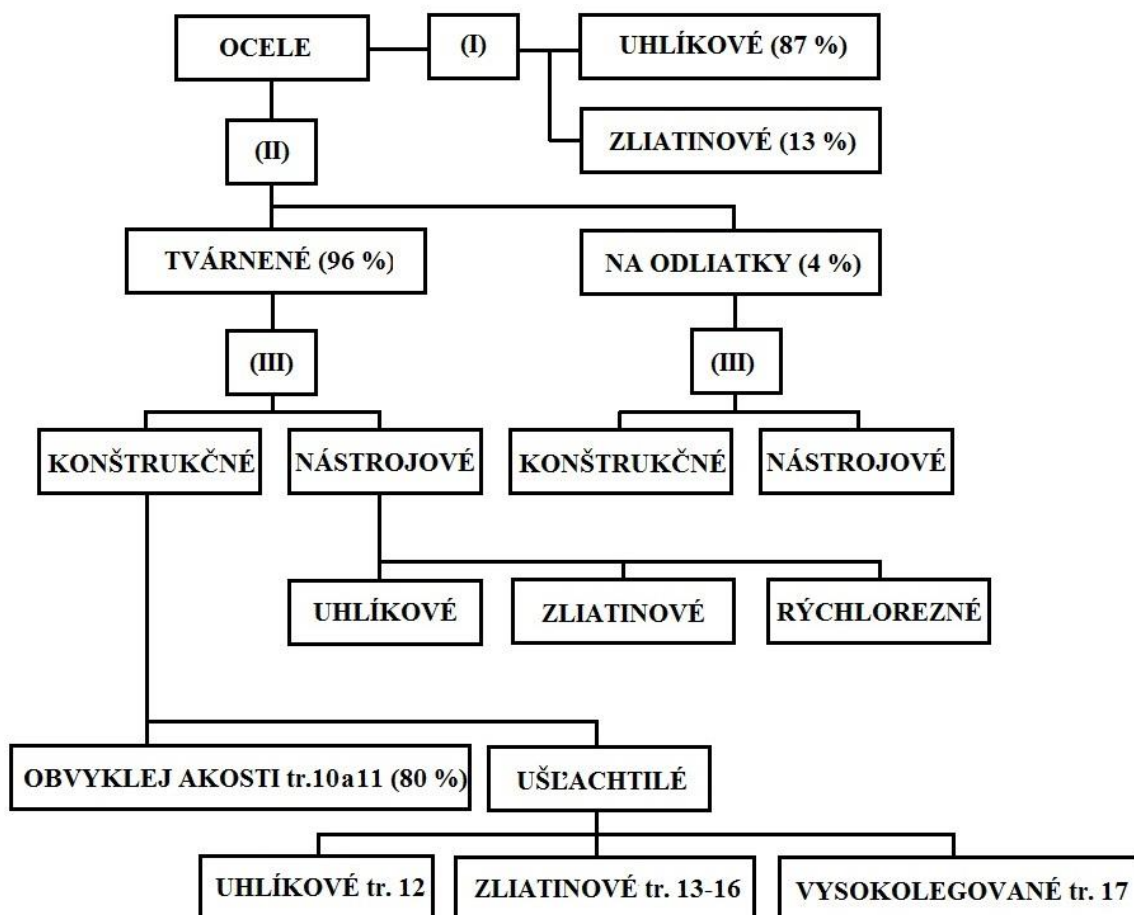
- tretia číslica charakterizuje súčet stredných obsahov legujúcich prvkov v desatinách %
- štvrtá číslica charakterizuje stredný obsah C v desatinách %, ak je stredný obsah C > 0,92%, štvrtá číslica je 0

#### Ocele triedy 17

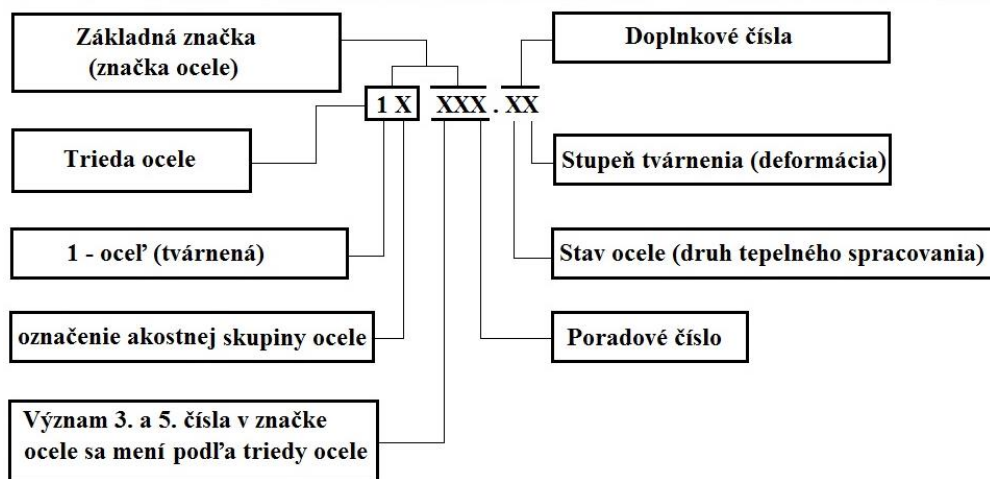
- tretia číslica charakterizuje typ legovania ocelí jednotlivými legujúcimi prvkami alebo skupinou legujúcich prvkov
- štvrtá číslica charakterizuje obsah hlavných legujúcich prvkov Cr, Mn a Ni

#### Ocele triedy 19

- tretia číslica charakterizuje jednak nelegované ocele, jednak typ legovania ocelí jednotlivými legujúcimi prvkami alebo skupinou legujúcich prvkov
- štvrtá číslica tvorí v spojení s treťou číslicou dvojčíslicie, ktoré charakterizuje obsah C v oceli



Obr. 2.1 Schéma rozdelenia a označenia ocelí na tvárnenie podľa STN 42 0002



Obr. 2.2 Schéma rozdelenia a označenia ocelí na tvárnenie

### Význam prvej doplnkovej číslice

0 - tepelne nespracovaný, 1 - normalizačné žíhaný, 2 - žíhaný s uvedením druhu žíhania, 3 - žíhaný na mätko, 4 - kalený, prípadne kalený a nízkoteplotne popúšťaný, 5 - normalizačné žíhaný a popúšťaný, 6 - zošľachtený na dolnú pevnosť danej ocele, 7 - zošľachtený na strednú pevnosť danej ocele, 8 - zošľachtený na hornú pevnosť danej ocele, 9 - zvláštny stav tepelného spracovania

## 2. OZNAČOVANIE OCELÍ PODĽA EN 10027-1

Rozdelenie a označovanie ocelí sa v Európe zjednocuje na základe európskych noriem (EN) a postupne sa stanú normami celoeurópskymi. V SR sú vydávané ako STN EN.

Rozdelenie ocelí je dané európskou normou EN 10020, v ktorej sa definuje:

- pojem ocele k tvárneniu,
- rozdelenie druhov ocelí podľa chemického zloženia,
- rozdelenie do hlavných skupín akosti na základe vlastností a účelu použitia.

Ako *ociele k tvárneniu* sú označované materiály, u ktorých hmotnostný podiel železa je väčší než ktoréhokoľvek iného prvku, obsahujú menej ako 2 %C a obsahujú ďalšie prvky.

### Rozdelenie ocelí podľa chemického zloženia:

- a) *Nelegované ocele* - sú tie, u ktorých obsah jednotlivých prvkov nedosahuje tieto medzné hodnoty:

|           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Mn = 1,65 | Si = 0,60 | Cu = 0,40 | Ni = 0,30 |
| W = 0,30  | Co = 0,30 | Al = 0,30 | V = 0,10  |
| Mo = 0,08 | Ti = 0,05 | Bi = 0,10 | Nb = 0,06 |
| Zr = 0,05 | Pb = 0,40 | B = 0,008 |           |

Hmotnostný podiel prvkov je uvedený v %.

- b) *Legované ocele* – sú tie, u ktorých obsah jednotlivých prvkov minimálne v jednom prípade dosahuje alebo prekračuje vyššie uvedené medzné hodnoty obsahu legujúcich prvkov.

***Rozdelenie ocelí podľa hlavných skupín akosti na základe vlastností a účelu použitia:***

**1. Nelegované ocele**

- a) *ocle obvyklých vlastností*, ktoré nevyžadujú zvláštne opatrenia k výrobe:

- nie sú určené pre tepelné spracovanie (podľa EN 10020 nie je žiadny druh žihania považovaný za tepelné spracovanie),
- požiadavky na akosť sú v súlade s hodnotami medzných hodnôt pre tieto ocele ( $R_{m \min} \leq 690 \text{ MPa}$ ,  $R_{e \min} \leq 360 \text{ MPa}$ ,  $A_5 \min \leq 26 \%$ ),
- s výnimkou obsahu Mn a Si nie sú predpísané žiadne obsahy legujúcich prvkov.

- b) *nelegované akostné ocele* – sú všetky nelegované ocele, ktoré nie sú zahrnuté v skupinách ocelí obvyklých akostí a ušľachtilých ocelí. Sú na ne kladené prísnejšie požiadavky (z hľadiska veľkosti zrna, tváriteľnosti, krehkého porušenia a pod.)

- c) *nelegované ušľachtilé ocele* – oproti akostným vykazujú vyšší stupeň čistoty. Sú určené pre zošľachtovanie alebo povrchové kalenie. Tu patria ocele s požiadavkou na nárazovú prácu, povrchovú tvrdosť, nízky obsah nekovových inklúzií a i.

**2. Akostné skupiny legovaných ocelí**

- a) *legované akostné ocele* – sú ocele, na ktoré sú stanovené požiadavky napr. na húževnatosť, veľkosť zrna alebo tváriteľnosť. Nie sú všeobecne určené pre zošľachtovanie a povrchové kalenie. Tu patria:

- zvariteľné jemnozrnné ocele, vrátane ocelí pre tlakové nádoby a zariadenia s medzou sklzu  $R_e \geq 360 \text{ MPa}$  a medzným obsahom legujúcich prvkov,
- legované ocele na koľajnice a banské výstuže,
- ocele pre valcované ploché výrobky, obsahujú prvky zjemňujúce zrno (B, Nb, Ti, V, Zr),
- ocele legované len Cu (Atmofix),
- ocele legované Si, Si - Al, určené pre elektrotechniku.

- b) *legované ušľachtilé ocele* – vlastnosti sú dosahované predpísaným chemickým zložením a zvláštnymi podmienkami spracovania. Zahrňujú legované konštrukčné ocele, legované ocele pre tlakové nádoby a zariadenia, ocele pre valivé ložiská, nástrojové ocele, rýchlorezné ocele, ocele so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami – feritické Ni ocele.

Podľa obsahu legujúcich prvkov sa delia na nasledujúce podskupiny:

- korozivzdorné ocele s obsahom  $Cr_{\min} \geq 10,5 \%$  a max. obsahom uhlíka 1,2 %,
- rýchlorezné ocele s obsahom  $C \geq 0,60 \%$  a  $Cr = 3,0 - 6,0 \%$ , okrem ďalších prvkov obsahujú min. dva z trojice Mo, W, V s celkovým obsahom nad 7 %.

Značky ocelí podľa EN 10027-1 sa delia do dvoch skupín:

**Kategória 1:** označovanie ocelí podľa použitia a mechanických alebo fyzikálnych vlastností

**Kategória 2:** označovanie ocelí podľa chemického zloženia

### Základné symboly

Základné symboly v značkách ocelí podľa použitia a mechanických alebo fyzikálnych vlastností, ako aj v značkách ocelí podľa chemického zloženia sú uvedené v tabuľkách nižšie. Platí, že ak je oceľ v tvare odliatku, základnej značke ocele predchádza písmeno G, u oboch kategórií. Ak sa oceľ vyrába technológiou práškovej metalurgie, základnej značke ocele predchádzajú písmená PM.

### Prídavné symboly

Prídavné symboly sa pridávajú k základným symbolom. Prídavné symboly sa rozdeľujú do dvoch skupín: skupina 1 a skupina 2. Ak symboly zo skupiny 1 nepostačujú na úplnú špecifikáciu ocele, potom sa pridávajú prídavné symboly zo skupiny 2. Prídavné symboly zo skupiny 2 sa majú používať len v spojení s prídavnými symbolmi zo skupiny 1.

Ďalšie prídavné symboly pre oceľové výrobky nasledujú po prídavných symboloch skupiny 1 a 2 a od predchádzajúcich symbolov sa oddeľujú znakom +.

### 2.1 Skupina 1 - označovanie ocelí podľa použitia a mechanických alebo fyzikálnych vlastností

1. Pre ocele na odliatky sa používa rovnaké označenie, ale pred značkou je písmeno G.

Príklad: **GS355K2**,  $R_{e\ min} = 355\ MPa$ ,  $KV = 40\ J$  pri  $T = -20\ ^\circ C$

Označovanie ocelí – skupina 1 pozostáva:

- a) Veľké písmeno – označuje typ ocele podľa použitia
- b) Číslo, ktoré nasleduje za písmenom, označuje vlastnosti ocele (min. medzu klzu  $R_{e\ min}[MPa]$ )
- c) Prídavné symboly:

J,K - normalizačne valcované

N - normalizované

M - termomechanicky spracované

Q - zušľachtené

A - precipitačné vytvrdené

#### Príklady značenia:

**S** – ocele pre oceľové konštrukcie – všeobecné použitie. Ich vlastností sú stanovené súborom noriem EN 10025-1 až 6.

Príklad: S355J2W,  $R_{e\ min} = 355\ MPa$ ,  $J2 = KV > 27\ J$  pri  $T = -20\ ^\circ C$ ,

W = odolnosť proti atmosférickej korózii,

**P** – ocele na tlakové zariadenia

Príklad: P265H,  $R_{e\ min} = 265\ MPa$ , H – vysoké teploty,

**L** – ocele na rúry diaľkovodov

Príklad: L360Q,  $R_{e \min} = 360$  MPa, Q = zušľachtené,

**E** – ocele na strojné súčiastky

Príklad: E295C,  $R_{e \min} = 295$  MPa, C = tvárniteľné za studena,

**B** – ocele pre výstuž do betónu, nasleduje číslo udávajúce charakteristickú medzu klzu ( $R_{eH}$ ,  $R_{eL}$ ,  $R_p$ )

Príklad: B500H,  $R_{e \min} = 500$  MPa, H = tyče,

**Y** – ocele pre výstuž do betónu

Príklad: Y1770C,  $R_{m \min} = 1770$  MPa, C = drôt ťahaný za studena,

**R** – ocele pre koľajnice alebo vývalky podobného tvaru,

Príklad: R0900Mn,  $R_{m \min} = 900$  MPa, Mn - zvýšený obsah mangánu,

**H** – ploché výrobky valcované za studena

Príklad: H420M,  $R_{e \min} = 420$  MPa, M – termomechanicky spracované,

**D** – ploché výrobky valcované za studena (okrem 2d)

Príklad: DC04EK, C04 – valcované za studena, EK – pre smaltovanie,

**T** – tenké a pocínované plechy pre obalovú techniku

Príklad: TH52, H52 – stredná hodnota predpísaného rozmedzia tvrdosti,

**M** – ocele pre elektrotechnické účely.

## 2.2 Skupina 2 - označovanie ocelí podľa chemického zloženia

Aby boli značky legovaných ocelí z praktického hľadiska čo najkratšie, niektoré znaky alebo symboly sa vynechávajú do takej miery, aby nevzniklo riziko zámieny s inou podobnou akosťou ocele.

Znacky sú vytvorené na základe chemického zloženia ocelí. Sú ďalej rozdelené do štyroch podskupín:

### 1. Základná značka pre nelegované ocele so stredným obsahom Mn < 1%.

Značka sa skladá z týchto symbolov:

- písmena C,
- čísla - obsah „C“ x 100 (100x stredný obsah uhlíka)
- písmeno, bližšie charakterizujúce danú oceľ:

E - predpísaný max. obsah síry, R - predpísaný rozsah pre obsah síry, D – pre ťahané drôty, C – pre tvárnenie za studena, S – pre pružiny, U – nástrojové, W – pre zvaracie drôty, G – iné charakteristiky.

Príklad označenia: C35E.

### 2. Nelegované ocele s obsahom Mn $\geq 1$ %, legované ocele s obsahom legúr do 5 %:

- čísla C x 100
- chemické značky legujúcich prvkov v klesajúcom poradí podľa obsahu,
- nasledujú x-x čísla, oddelené pomlčkou, ktoré odpovedajú strednému obsahu prvkov vynásobenému nasledujúcim koeficientom, zaokrúhlené na celé číslo.  
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W x koeficient 4,

[illegible]

Príklad označenia:  $^{28}\text{Mn}6$ .

### 3. Legované ocele s obsahom aspoň 1 prvku nad 5 %:

- charakteristické písmeno X,
- číslo - obsah „C“ x 100,
- chemické značky pre legujúce prvky v klesajúcom poradí podľa obsahu,
- nasledujú x-x čísla, oddelené pomlčkou, ktoré odpovedajú strednému obsahu príslušného prvku, zaokrúhlené na najbližšie vyššie číslo.

Príklad označenia: X5CrNi18-10.

#### 4. Základné označenie rýchlorezných ocelí:

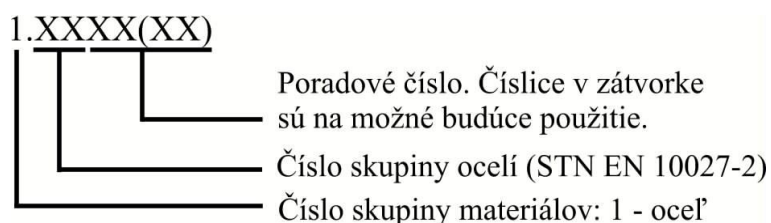
- charakteristické písmeno HS,
- obsahy legujúcich prvkov x-x čísla, udávajúce obsah legujúcich prvkov v poradí W, Mo, V, Co (stredný obsah zaokrúhlený na celé číslo).

Príklad označenia: HS2-9-1-8.

## Číselné označovanie ocelí podľa EN 10027-2

Číselné označovanie ocelí je doplnením označovania ocelí podľa EN 10027-1. Skladá sa z pevného počtu číslic, čo je vhodnejšie pre spracovanie údajov ako značky ocelí podľa EN 10027-1.

Každé číselné označenie zodpovedá len jednej akosti ocele a naopak, každá akosť ocele má priradené jedno číselné označenie.



Číslo ocelí sú priradované jednotlivým akostiam podľa špecifických vlastností ako:

- a) Chemické zloženie
- b) Vlastnosti určené štandardnými skúškami, napr. tvrdosť, vlastnosti pri namáhaní v ťahu, rázové vlastnosti, prekaliteľnosť, korózna odolnosť, metalografické charakteristiky
- c) Vhodnosť pre určitý typ spracovania, napr. tvárnenie za studena
- d) Vhodnosť pre určitú aplikáciu, napr. drôty na výstuž pneumatík

Rozdiely v požiadavkách na stav dodania, ktoré neovplyvňujú vlastnosti materiálu, napr. typ značenia, vzhľad povrchu, rozmery a pod. nie sú dôvodom na pridelenie iného číselného označenia materiálu. V prípade, že modifikácie a ďalšie požiadavky spôsobia významnú zmenu

vlastností materiálu, napr. redukcia maximálneho obsahu síry z 0,035% na 0,010%, môže to byť dôvodom na priradenie nového číselného označenia k danému materiálu.

#### Príklady čísiel ocelí: (STN EN 10027-2)

##### *Nelegované ocele:*

- základné ocele: 1.00, 1.90
- akostné ocele: 1.01; 1.91 stavebné konštrukčné ocele s  $R_m < 500$  MPa  
1.03; 1.93 ocele s obsahom C  $< 0,12\%$  alebo  $R_m < 400$  MPa  
1.06; 1.96 Ocele s obsahom C  $\geq 0,55\%$  alebo  $R_m \geq 700$  MPa
- ušľachtilé ocele: 1.10 ocele so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami  
1.12 konštrukčné ocele, ocele pre tlakové nádoby s C  $\geq 0.55$   
1.15 nástrojové ocele

##### *Legované ocele:*

- akostné ocele: 1.08, 1.98 ocele so špeciálnymi fyzikálnymi vlastnosťami
- ušľachtilé ocele: 1.20 Cr nástrojová oceľ  
1.23 Cr-Mo, Cr-Mo-V, Mo-V - nástrojové ocele  
1.35 ocele na valivé ložiska  
1.48 žiaruvzdorné ocele s Ni  $\geq 2,5\%$   
1.71 Cr-Si, Cr-Mn, Cr-Mn-B, Cr-Si-Mn konštr. ocele pre tlakové nádoby

#### OZNAČOVANIE OCELÍ NA ODLIATKY

Pre ocele na odliatky v súčasnej dobe neexistuje ekvivalent normy pre rozdelenie ocelí na tvárnenie STN EN 10020.

Podľa spôsobu použitia môžeme ocele na odliatky rozdeliť na:

- a) nelegované a legované ocele na odliatky pre všeobecné použitie,
- b) ocele pre odliatky tlakových nádob,
- c) koróziuvzdorné ocele pre všeobecné použitie,
- d) žiaruvzdorné ocele na odliatky pre všeobecné použitie,
- e) materiály pre odstredivo liate výrobky.

Pre označovanie ocelí na odliatky platí systém označovania ocelí podľa nasledujúcej schémy:

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 1. skup. | 2. skup. | 3. skup. |
| G        | nnn      | a....n-n |

Ocele na odliatky sa s výhodou používajú pre odlievanie súčiastok zložitých tvarov. Zlepšenie ich vlastností je možné len tepelným spracovaním. Ocele na odliatky tvoria samostatnú skupinu.

Ocele na odliatky sa odlievajú vždy ako upokojené. Ku konečnej dezoxidácii sa používa Al a jeho prebytok v oceli musí byť tak veľký, aby sa zabránilo reakcii C s FeO a tým vzniku bublín CO, ktoré sú u odliatkov neprípustné. Ocele na odliatky sa tavia prevažne v elektrických oblúkových a indukčných peciach a len veľmi ťažké odliatky sa odlievajú zo SM pecí.

Aj pri dôslednej technológii odlievania sa v odliatkoch z ocele vyskytujú mikropóry, ktoré pôsobia ako vruby. Ocele na odliatky pri rovnakom chemickom zložení a tepelnom spracovaní majú nižšie mechanické vlastnosti ako ocele tvárnené (preto, že sa austenitické zrno zjemňuje len tepelným spracovaním, zatiaľ čo u tvárnych ocelí aj tvárnením za tepla).

Odliatky z uhlíkových ocelí na odliatky sa obvykle normalizačne žihajú za účelom dosiahnutia jemnozrnejšej rovnomernej štruktúry, po ktorom nasleduje žihania na odstránenie vnútorného napätia. Uhlíkové ocele na odliatky sa zošľachťujú len zriedka, ale zliatinové ocele na odliatky okrem žihania sa často zošľachťujú. Úspešne sa môže aplikovať aj chemicko-teplné spracovanie.

### OZNAČOVANIE LIATIN

Liatiny možno rozdeliť použitím systému európskej normalizácie pre ich označovanie. Systém označovania liatin je uvedený v STN EN 1560. Na označovanie liatin sa používa jednak systém skráteného označovania, jednak systém číselného označovania.

#### Systém skráteného označovania liatin

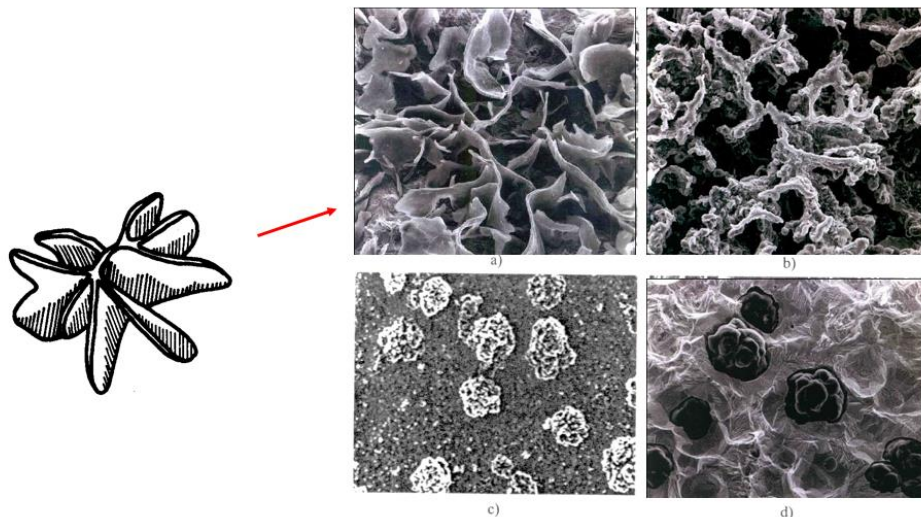
Značka liatiny je tvorená písmenami a číslami usporiadanými do šiestich pozícií:

1. pozícia obsahuje znaky EN,
2. pozícia obsahuje znaky GJ (odliatok z liatiny),
3. pozícia uvádza označenie pre tvar grafitu veľkým písmenom podľa tab. 2.1. Označenie sa pripája k symbolu na 2. pozícii bez medzery,
4. pozícia sa pripája len v prípade kedy je nutné označiť mikro- alebo makroštruktúru. Inak sa vynecháva. K označeniu mikro- a makroštruktúry sa používajú značky uvedené v tab. 2.2.

Tvar grafitu je uvedený na obr. 2.3.

Tab. 2.1 Označenie tvaru grafitu

|   |                        |   |                                               |
|---|------------------------|---|-----------------------------------------------|
| L | lupienkový             | V | vermikulárny                                  |
| S | guľôčkový              | N | ledeburitické liatiny bez grafitu             |
| M | vločkový (temperovaný) | Y | zvláštny tvar uvedený v príslušnej mat. norme |



Obr. 2.3 Tvar grafitu: a) lupienkový, b) vermikulárny (červíkový), c) pavúčikovitý, d) gulôčkový

Tab. 2.2 Označenie mikro- a makroštruktúry

|   |           |   |                          |
|---|-----------|---|--------------------------|
| A | austenit  | Q | štruktúra po zakalení    |
| F | ferit     | T | štruktúra po zošľachtení |
| P | perlit    | B | neoduhličená štruktúra*  |
| M | martenzit | W | oduhličená štruktúra*    |
| L | ledeburit |   |                          |

\* Platí pre temperovanú liatinu

5. pozícia uvádza buď mechanické vlastnosti liatiny alebo jej chemické zloženie

Označenie podľa mechanických hodnôt

Mechanické hodnoty sa zisťujú buď na oddelene liatych alebo priliatych skúšobných vzorkách, alebo na vzorkách vyrezaných z odliatku. Spôsob výroby skúšobnej vzorky udáva písmeno uvedené v tab. 2.3, ktoré nasleduje za číselným označením mechanických hodnôt.

Tab. 2.3 Označenie spôsobu výroby skúšobnej vzorky

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| S | oddelene liata skúšobná vzorka      |
| U | priliata skúšobná vzorka            |
| C | skúšobná vzorka vyrezaná z odliatku |

*Označenie pevnosti*

Číslo udáva najmenšiu zaručenú pevnosť v MPa.

Príklad: **EN GJL-150C** – liatina s lupienkovým grafitom, s min. pevnosťou 150 MPa. Pevnosť bola stanovená na skúšobnej vzorke vyrobenej vyrezaním z odliatku.

*Označenie ťažnosti*

Pokiaľ sa udáva ťažnosť, pridáva sa za údaj minimálnej pevnosti ako minimálna hodnota v percentách, hneď za pomlčkou.

Príklad: **EN GJS-350-22U** – liatina s guľôčkovým grafitom, s min. pevnosťou 350 MPa a min. ťažnosťou 22 %. Mechanické hodnoty boli stanovené na priliatej vzorke.

*Označenie teploty pri skúške rázom v ohybe*

Ak sa vyžaduje skúška rázom v ohybe, potom sa teplota skúšania označuje písmenami uvedenými v tab. 2.4. Písmena sa uvádzajú po pomlčke za mechanickými vlastnosťami.

Tab. 2.4 Označenie teploty skúšky rázom v ohybe

| RT | izbová teplota | LT | nízka teplota |
|----|----------------|----|---------------|
|----|----------------|----|---------------|

*Označenie tvrdosti*

Pri označovaní tvrdosti liatiny sa používajú nasledujúce skratky:

- a) HB – tvrdosť podľa Brinella,
- b) HV – tvrdosť podľa Vickersa,
- c) HR – tvrdosť podľa Rockwella.

Príklad: **EN GJL-HB155** – liatina s lamelárnym grafitom, tvrdosť 155 HB.

*Označenie podľa chemického zloženia*

Pokiaľ sa liatina označuje podľa chemického zloženia, potom musí 5. pozícia začínať písmenom X. Za znakom X nasledujú chemické značky podstatných legujúcich prvkov v poradí s klesajúcim obsahom. Nasledujúce čísla udávajú obsah legujúcich prvkov v percentách. Čísla sú oddelené pomlčkami. Obsah uhlíka sa udáva stonásobkom za písmenom X, ale nemusí byť vôbec udaný.

Príklad: **EN-GJL-XNiMn13-7** – liatina s lupienkovým grafitom s 13 % Ni a 7 % Mn,

**EN-GJN-X300CrNiSi9-5-2** – liatina s obsahom C = 3 %, Cr = 9 %, Ni = 5 %, Si = 2 %, grafit nie je vylúčený.

6. pozícia uvádza dodatočné požiadavky na odliatok – tab. 2.5

Tab. 2.5 Dodatočné požiadavky na odliatok

|   |                                        |
|---|----------------------------------------|
| D | tepelné nespracovaný odliatok          |
| H | tepelné spracovaný odliatok            |
| W | vhodný pre zvaranie                    |
| Z | ďalšie požiadavky uvedené v objednávke |

**Systém číselného označovania liatin**

Značka je tvorená písmenami, číslami a pomlčkou v deviatich pozíciách podľa schémy:

|         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pozícia | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Znak    | E | N | - | X | X | n | n | n | n |

Kde, 1– 3. pozícia má nemenné zloženie znakov EN-,

1. pozícia používa písmeno J,
2. pozícia označuje tvar grafitu podľa tab. 2.1,
3. pozícia predstavuje hlavnú uvádzanú vlastnosť liatiny podľa tab. 2.6.

Tab. 2.6 Hlavná uvádzaná vlastnosť liatiny

|   |                   |   |         |
|---|-------------------|---|---------|
| 0 | rezerva           | 5 | rezerva |
| 1 | pevnosť           | 6 | rezerva |
| 2 | tvrdosť           | 7 | rezerva |
| 3 | chemické zloženie | 8 | rezerva |
| 4 | rezerva           | 9 | rezerva |

7- 8. pozícia je dvojmiestne číslo, ktoré označuje jednotlivé materiály,

9. pozícia uvádza zvláštne požiadavky na jednotlivé materiály podľa tab. 2.7

Tab. 2.7 Zvláštne požiadavky na jednotlivé materiály

|   |                                     |   |                                          |
|---|-------------------------------------|---|------------------------------------------|
| 0 | žiadne zvláštne požiadavky          | 5 | rázová húževnatosť pri nízkych teplotách |
| 1 | oddelené liate skúšobné vzorky      | 6 | stanovená vhodnosť k zváraniu            |
| 2 | priliate skúšobné vzorky            | 7 | tepelne nespracovaný odliatok            |
| 3 | skúšobné vzorky vyrezané z odliatku | 8 | tepelne spracovaný odliatok              |
| 4 | rázová húževnatosť pri izbovej T    | 9 | ďalšie požiadavky podľa objednávky       |

**Úlohy:**

1. Pre zadanú súčiastku na základe požadovaných vlastností (mechanických vlastností a pracovných podmienok) navrhnete vhodnú oceľ podľa STN.
2. Nájdite ekvivalent navrhnutej ocele podľa EN.
3. Na základe daného chemického zloženia stanovte značky oceli (STN EN 10027-1, skupina 2)

### Téma č. 3: MAKROSKOPICKÁ ANALÝZA KOVOV

Metalografia sa zaoberá prípravou materiálov na štúdium ich štruktúrnych charakteristík. Je silným nástrojom pri hľadaní vzťahu medzi vnútornou stavbou materiálu k jeho fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami. Metalografická príprava materiálov má za úlohu pripraviť povrch materiálov na mikroskopické pozorovanie štruktúry. Proces prípravy materiálov na metalografické pozorovanie začína výberom vhodnej reprezentatívnej vzorky na skúmanie, odberom malého objemu materiálu z tejto vzorky, pokračuje brúsením, leštením a leptaním, kde sa odhalí štruktúra vzorky. Mikroskopickým pozorovaním potom vieme určiť také štruktúrne charakteristiky, ako je veľkosť zrna, veľkosť, tvar a rozloženie fáz, nekovových inklúzií, identifikovať segregáciu a iné heterogenity v štruktúre materiálov.

Precízna príprava materiálov je kľúčovou podmienkou pre spoľahlivé metalografické štúdium materiálov (získavanie rôznych fáz prítomných v materiáli). Nesprávna príprava povrchu materiálu môže zakryť ich skutočnú mikroštruktúru a viesť k nesprávnym výsledkom.

Postup prípravy vzorky je uvedený na obr. 3.1.

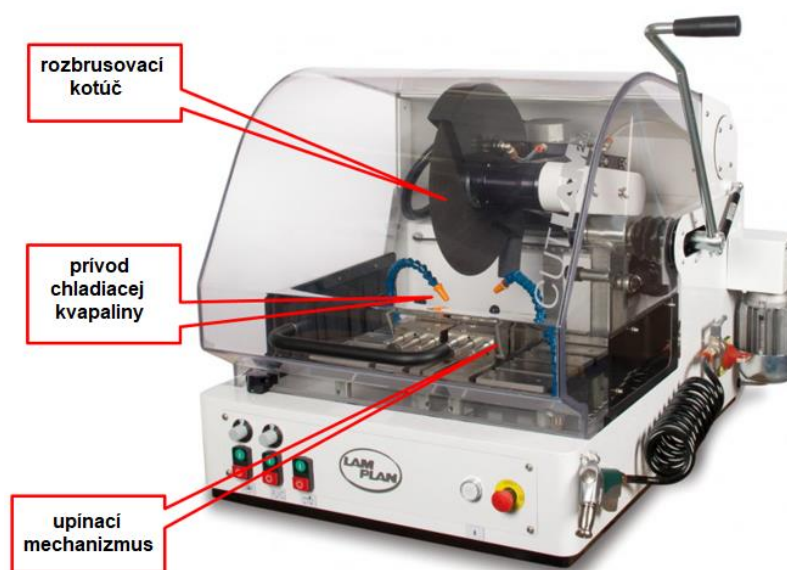


Obr. 3.1 Postup prípravy vzoriek na metalografické štúdium

Etapy prípravy vzoriek na metalografické pozorovanie:

### 1. Odber vzorky z produktu

Pri odbere materiálu je potrebné mať na pamäti účel pozorovania a na základe neho zvoliť vhodné miesto odberu. Odoberatý materiál by mal obsahovať objekt záujmu – napr. povrchovú vrstvu s upravenými vlastnosťami (povrchovým kalením, povlakom, chemicko-tepelným spracovaním povrchu, spevnením povrchových vrstiev a pod.), alebo by mal reprezentovať celú vzorku. Oddelenie tejto reprezentatívnej časti materiálu sa musí tiež vykonať veľmi starostlivo. Operácie ako strihanie vedú k výraznému deformačnému spevneniu materiálu za studena v mieste strihu, ktoré môže zmeniť mikroštruktúru vzorky. Najlepšou technikou odberu materiálu je abrazívne rezanie s výdatným chladením, aby sa zabránilo tepelnému ovplyvneniu materiálu, obr. 3.2.

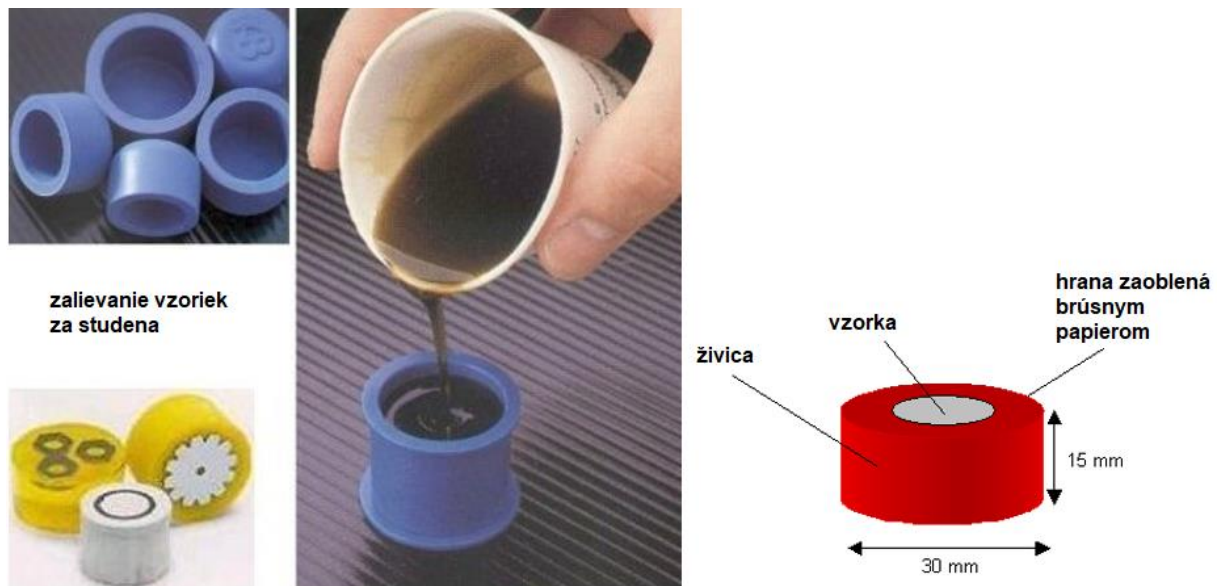


Obr. 3.2 Metalografická píla

### 2. Zalievanie do živíc

Pre lepšiu manipuláciu s materiálmi malých rozmerov je vhodné ich zalievať do živice do teflónových foriem, obr. 3.3. **Zalievanie za tepla** sa uskutočňuje do fenolovej živice pri teplote 200°C. Vyššia teplota predstavuje riziko zmeny štruktúry vo vzorke, ktorá sa má pozorovať. Pri **zalievaní za studena** sa používajú akrylové, epoxidové alebo polyesterové živice. Pri tomto procese nehrozí riziko zmeny štruktúry. Okraje živice so vzorkou by sa mali zaobliť, aby sa minimalizovalo poškodenie brúsnych a leštiacich kotúčov.

Vzorka zaliata do živice sa ďalej pripravuje brúsením. Okrúhly tvar živice je vhodný pre upnutie do vhodných prípravkov, ktoré umožňujú brúsenie a leštenie niekoľkých vzoriek v automatických strojoch naraz, čím sa šetrí čas.



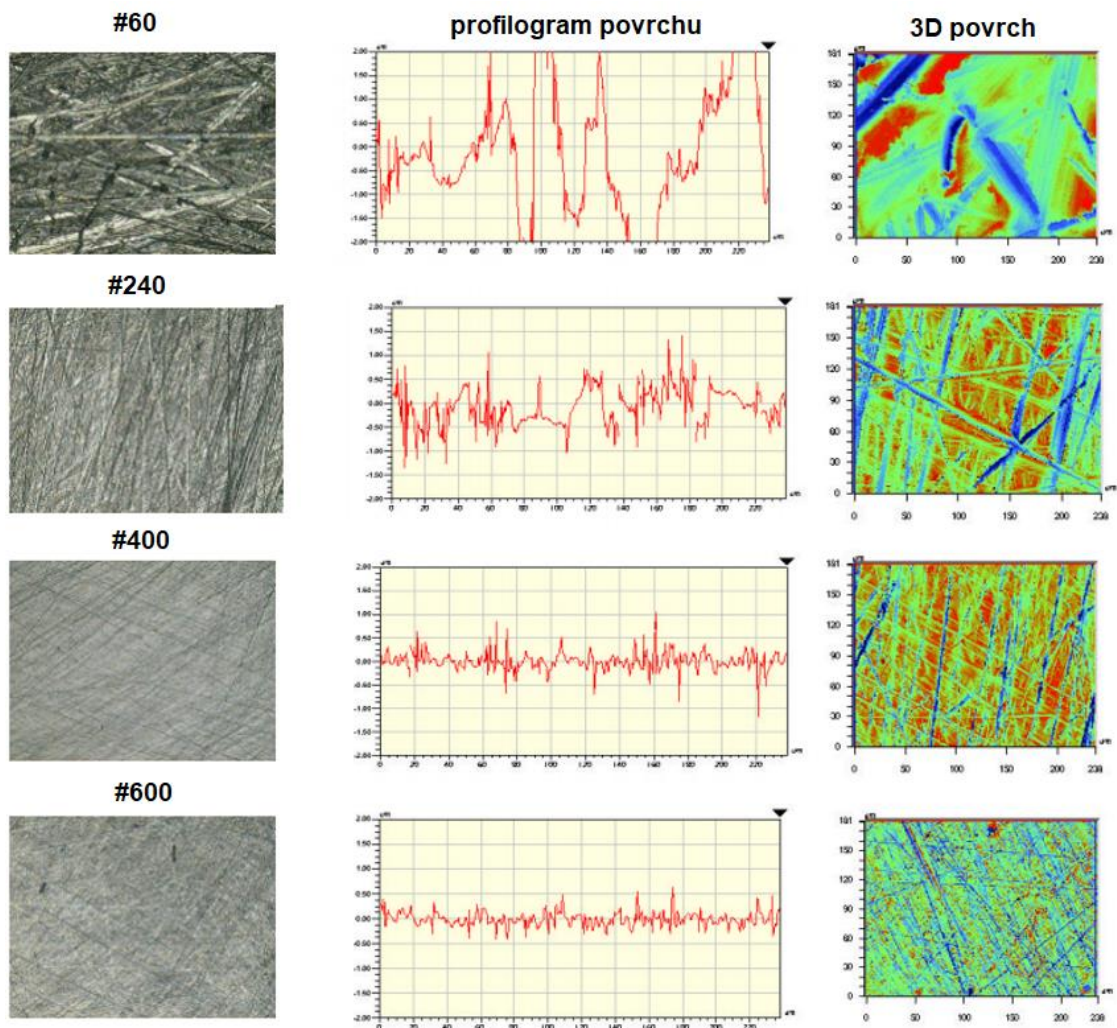
Obr. 3.3 Zalievanie vzorky do živice

### 3. Brúsenie

Účelom brúsenia je vytvoriť základňu - rovný povrch, potrebný pre následné brúsenie a leštenie. Brúsnym nástrojom sú brúsne papiere alebo pásy s nalepeným abrazivom SiC. Zrornosť brúsnych papierov je nasledovná: #180, #240, #320, #400, #600, #800, #1000. Zrornosťou rozumieme počet zŕn abraziva danej veľkosti, ktoré sa zmestia na plochu 1 štvorcového palca. Aby sa zabránilo ohrevu vzorky, uprednostňuje sa mokré brúsenie. Voda privádzaná na brúsny papier odvádza teplo aj obrúsené častice. Brúsi sa postupne od hrubších brúsnych papierov k jemnejším. Pri brúsení sa vorka pritláča na brúsny papier v stabilnej polohe. Pri každej zmene zrnosti brúsneho papiera sa odporúča otočiť vzorku o 90°, aby sa odstránili ryhy z predchádzajúceho brúsenia hrubším brúsnym papierom. Brúsenie na brúsnom papieri jednej zrnosti by sa malo vykonávať dovtedy, kým sa neodstránia ryhy z predchádzajúceho brúsenia. To sa kontroluje počas brúsenia na metalografickom mikroskope. Obr. 3. 4 uvádza profil povrchov brúsených papierom s rôznou zrornosťou.

### 4. Leštenie

Jemne vybrúsená vzorka sa pritlačí na elektricky poháňaný leštiaci kotúč s povrchom z rôznych materiálov, napr. látkový (obr. 3.5), zmáčaný suspenziou brusiva vo vode. Jemné povrchové nerovnosti sa odstránia ich mechanickou deformáciou – zatlačením účinkom obĺych jemných oxidov, ktoré sú v suspenzii. Výsledný povrch po leštení má zrkadlový lesk bez rýh.



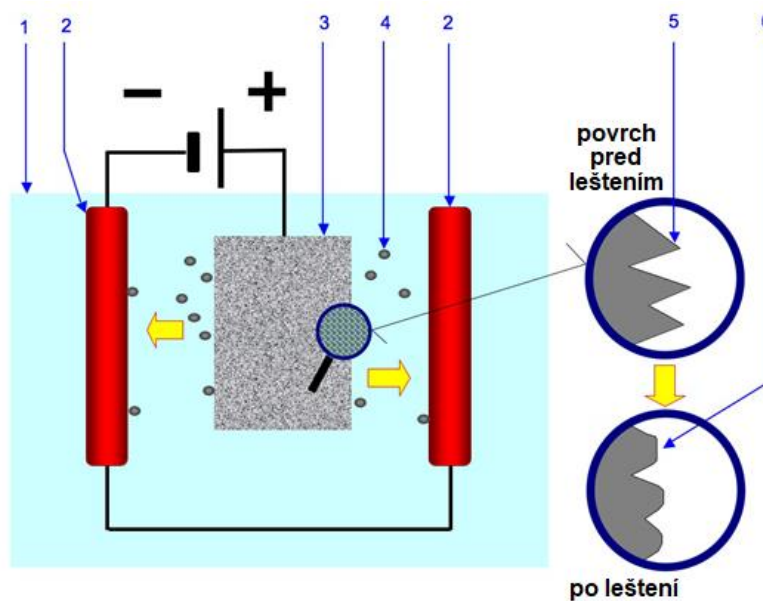
Obr. 3.4 Vzhľad a profil povrchov po brúsení



Obr. 3.5 Stroj na mechanické leštenie

Pri pozorovaní leštenej vzorky (neleptanej) pomocou mikroskopu je možné pozorovať póry, praskliny, inklúzie, nekovové fázy (napr. grafit). Zrná, hranice zrn, fázy atď. Je možné pozorovať až po naleptaní vyleštenej vzorky.

Okrem mechanického leštenia je možné brúsené povrchy leštiť elektrochemicky – rozpustením výstupkov nerovností prechodom jednosmerného prúdu od pomocnej elektródy cez elektrolyt k brúsenému povrchu, obr. 3.6.

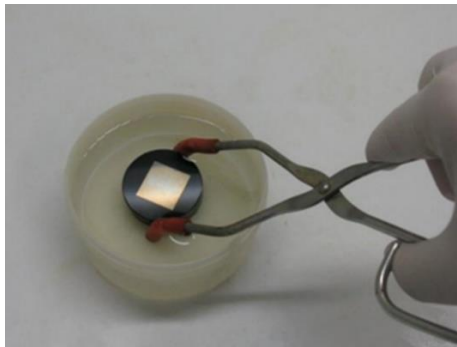


Obr. 3.6 Schéma elektrolytického leštenia

1 – elektrolyt, 2 – katóda, 3 – anóda, 4 – častice pohybujúce sa od anódy ku katóde

## 5. Leptanie

Princíp leptania spočíva v selektívnom rozpúšťaní mikroštruktúrnych zložiek leptadlom. Leptanie pozostáva z ponorenia vyleštenej vzorky do chemického činidla - leptadla na určitý čas (sekundy až hodiny), oplachu vo vode, oplachu v etanole a osušení vzorky, obr. 3.7. Leptanie umožňuje zviditeľniť mikroštruktúrne detaily, ktoré by neboli viditeľné na vyleštenej, neleptanej vzorke. Sú to: hranice zrna, segregácia, tvar, veľkosť a rozloženie fáz, mechanická deformácia atď. Schéma zobrazenia leptania je na obr. 3.8.

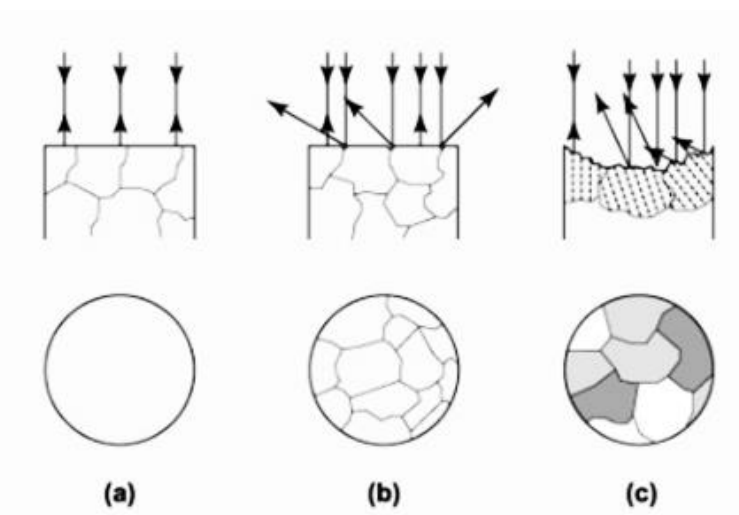


Obr. 3.7 Leptanie metalografickej vzorky

Každý materiál či zliatina si vyžaduje iné leptadlo s inou expozičnou dobou. Príklad leptadiel pre konkrétne materiály je uvedený v tab. 3.1.

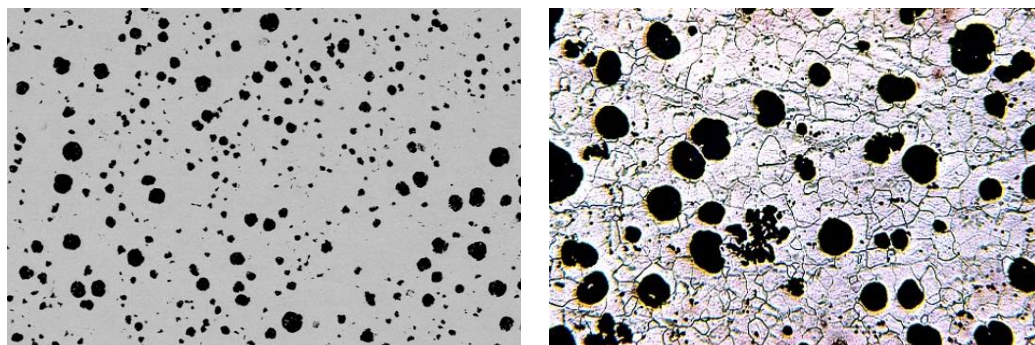
Tab. 3.1 Leptadlá vhodné pre konkrétne materiály

| materiál            | leptadlo                                                          | doba expozície     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------|
| kovaná oceľ         | 5 % roztok $\text{HNO}_3$ v alkohole                              | 30 s – 1 min.      |
| Liatina             | 2 % r. $\text{HNO}_3$ v alkohole alebo 5 % r. kyseliny pikovej    | 10 – 30 s          |
| vysokouhlíková oceľ | 1 % $\text{HNO}_3$ v alkohole                                     | 5 – 15 s           |
| nízklegovaná oceľ   | 10 % $\text{HNO}_3$ v alkohole                                    | do 1 min.          |
| nehrdzavejúca oceľ  | 10 % $\text{HNO}_3$ v alkohole                                    | 5 – 40 min.        |
| rýchllorezná oceľ   | ferialdehyd draselný + KOH v $\text{H}_2\text{O}$                 | 20 s – 6 min.      |
| Cu a jej zliatiny   | 10 % r. síranu amónneho v $\text{H}_2\text{O}$                    | -                  |
| Mg zliatiny         | 2 – 4 % r. $\text{HNO}_3$ v alkohole                              | -                  |
| Hliník              | 2 % r. HF (konc.) + 25 % r. $\text{HNO}_3$ v $\text{H}_2\text{O}$ | tampónovať<br>15 s |



Obr.3. 8 Schéma zobrazenia a) neleptaného povrchu: čistý obraz, žiadne známky mikroštruktúry, b) leptaného povrchu: hranice zŕn sú viditeľné, zrná majú rovnakú orientáciu, c) leptaného povrchu: hranice zŕn sú viditeľné, zrná majú rôznu orientáciu – každé zrno je naleptané s rôznou intenzitou, javí sa rôzne sfarbené

Rozdiel medzi neleptanou a leptanou metalografickou vzorkou je na obr. 3.9.



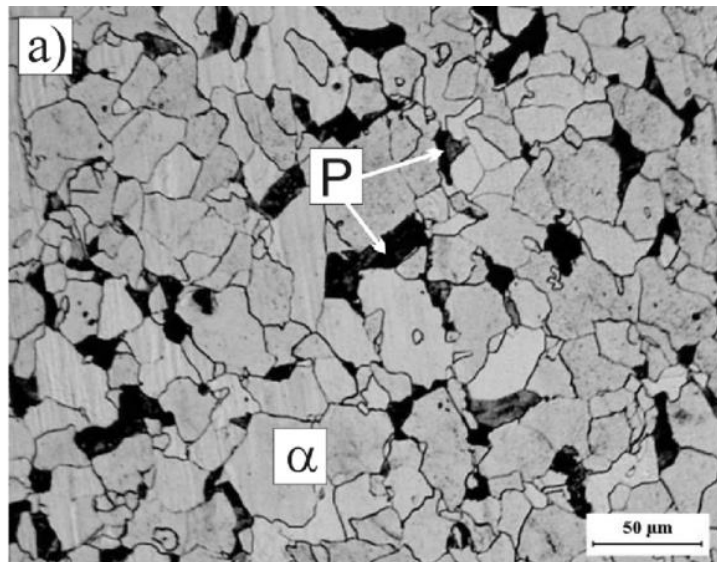
a)

b)

Obr. 3.9 Rozdiel medzi neleptanou (a) a leptanou (b) vzorkou – liatina s guľôčkovým grafitom

## 6. Pozorovanie mikroštruktúry pomocou svetelnej alebo skenovacej elektrónovej mikroskopie (SEM)

Posledným - konečným krokom je pozorovanie pripravenej vzorky optickým alebo elektrónovým mikroskopom pri rôznom zväčšení. Dôležité je používať v obrázkoch mierku, pretože pomáha pozorovateľom určiť zväčšenie obrazu a veľkosti štruktúrnych detailov prítomných vo vzorke (napr. veľkosť zrna atď.), obr. 3.10.



Obr. 3.10 Správne pripravený metalografický výbrus, leptaný, pripravený na pozorovanie (P – perlit,  $\alpha$  - ferit)

Povrch metalografických vzoriek je z dôvodu odstránenia povrchových vrstiev materiálu brúsením a leštením veľmi aktívny. Je schopný rýchlo reagovať so vzdušnou vlhkosťou a je veľmi náchylný na vznik korózie. Ak je potrebné uschovať pripravené vzorky na neskoršie pozorovanie, skladujú sa v nádobe s nízkou vlhkosťou vzduchu - exikátore, obr. 3.11.



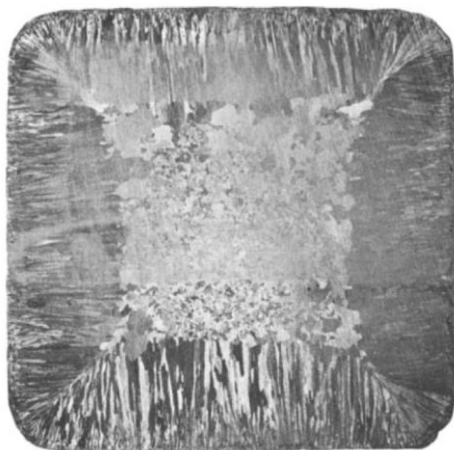
Obr. 3.11 Exikátor na uskladnenie vzoriek

**Makroskopická analýza** slúži na vyhodnotenie kvality a konzistencie skúšobnej vzorky len s použitím malého alebo žiadneho zväčšenia. Makroskopická analýza slúži na posúdenie kvality materiálu prostredníctvom vyhodnotenia makroštruktúrnych vlastností vzorky, ktoré môžu zahŕňať usporiadanie zŕn – tok vlákien, pórovitosť, prítomnosť trhlín a prasklín. Vzorka na makroskopické pozorovanie sa pripravuje podobne ako na metalografické pozorovanie - brúsením, leštením a leptaním. Leptanie je chemická reakcia na povrchu skúšobnej vzorky, ktorá umožňuje zviditeľniť napr. priebeh vlákien – usmernených zŕn materiálu, povrchovo upravené vrstvy v materiáli, jednotlivé oblasti zvarového spoja, a pod. Vzorky môžu byť ingoty, odliatky, platne, tyče, plechy alebo hotové výrobky. Výsledky makroskopického pozorovania môžu byť zdokumentované fotograficky ako podklad do správy o makroskopickej analýze.

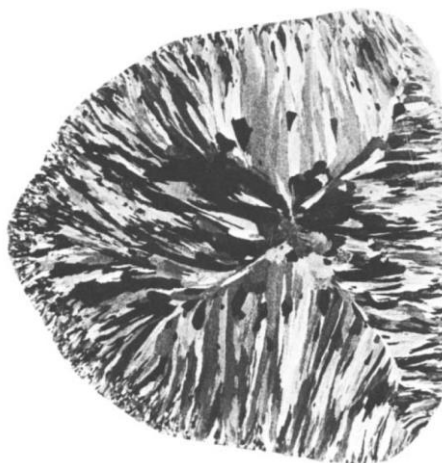
Makroskopická analýza sa často vykonáva u materiálov vystavených pasivácii, soľnej hmle, chemicko-tepelnému spracovaniu a pod. Častá je aj makroskopická analýza zvarov. Makroskopická analýza rezu zvarom odhalí vnútorné diskontinuity, profil zvaru, rozsah prevarenia, veľkosť tepelne ovplyvnenej oblasti a ďalšie. Makroskopická analýza zvaru je dôležitá pri posudzovaní zručnosti zvarača.

Makroskopická analýza sa vykonáva na pozdĺžnom alebo priečnom reze materiálu. Vzorka sa analyzuje voľným okom alebo pri malom zväčšení (menšom ako 10×).

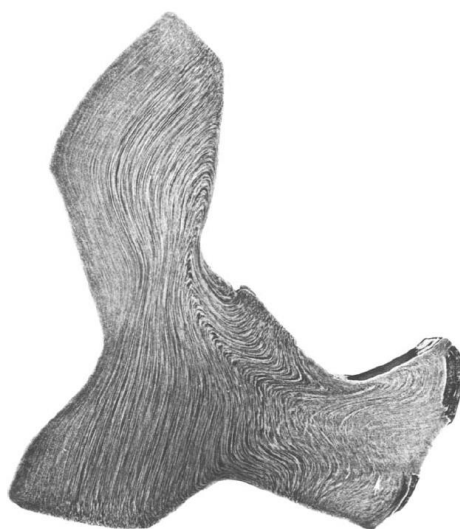
Niektoré príklady leptaných vzoriek sú uvedené na obr. 3.12 – 3.19.



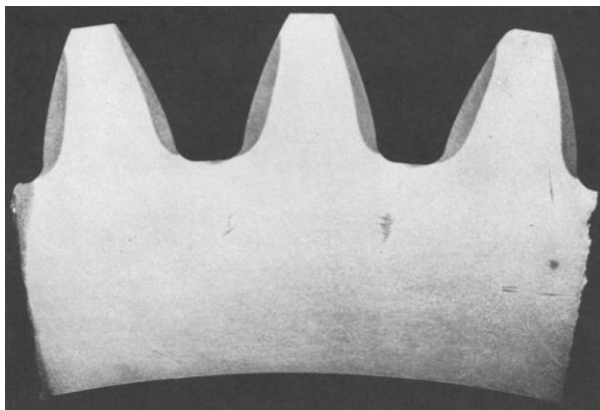
Obr. 3.12 Leptaný rez ingotom (leptadlo: 10 % vodný roztok  $\text{HNO}_3$ )



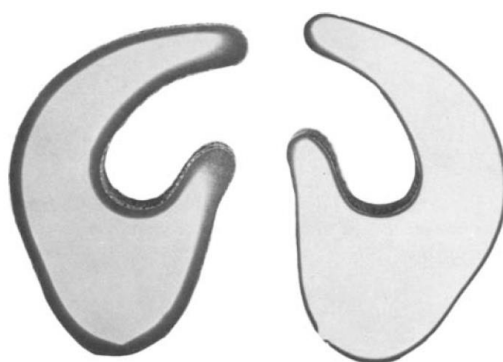
Obr. 3.13 Makroštruktúra odliatku z 99,8% hliníka vyrobeného odstredivým liatím  
(leptadlo: 5 ml  $\text{HNO}_3$ , 5ml  $\text{HCl}$ , 5ml  $\text{HF}$ , 95ml  $\text{H}_2\text{O}$ )



Obr. 3.14 Priebeh vlákien (stlačených zŕn) vo výrobku z legovanej ocele vyrobenom  
zápustkovým kovaním (hlboké leptanie v 50% vodnom roztoku  $\text{HCl}$  s tušom)



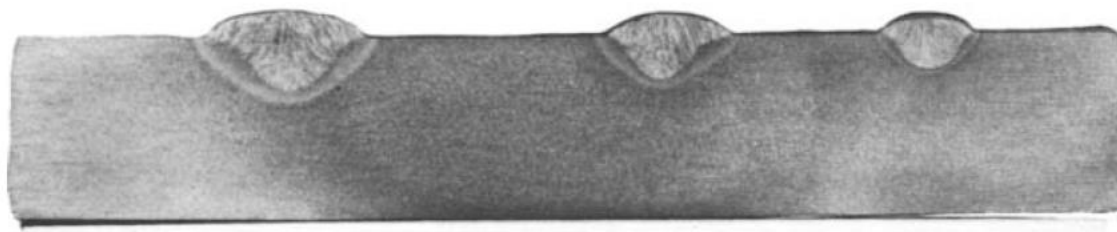
Obr. 3.15 Indukčne kalené zuby ozubenia z uhlíkovej ocele



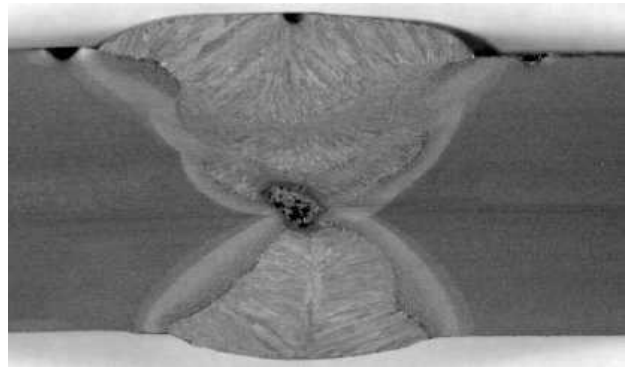
Obr. 3.16 Oceľové vačky - tepelne ovplyvnená zóna po rezaní plameňom



Obr. 3.17 Nauhličený vnútorný a vonkajší povrch ocelevej rúry



Obr. 3.18 Vplyv parametrov zvarania na hĺbku a tvar prievaru (zváranie pod tavivom, tepelný príkon – zľava 90, 60 a 30 kJ, 10% vodný roztok  $\text{HNO}_3$ )



Obr. 3.19 Makroštruktúra zvaru - základný materiál, tepelne ovplyvnená zóna a zvarový kov, chyby zvaru

### Úlohy:

- **Zoradíte do správneho poradia postup metalografickej prípravy vzorky:**

Krok č. .... Zalievanie vzorky do živice

Krok č. .... Pozorovanie

Krok č. .... Leptanie

Krok č. .... Leštenie

Krok č. .... Odber materiálu

Krok č. .... Brúsenie

- **Vyberte správnu možnosť v nasledujúcich tvrdeniach:**

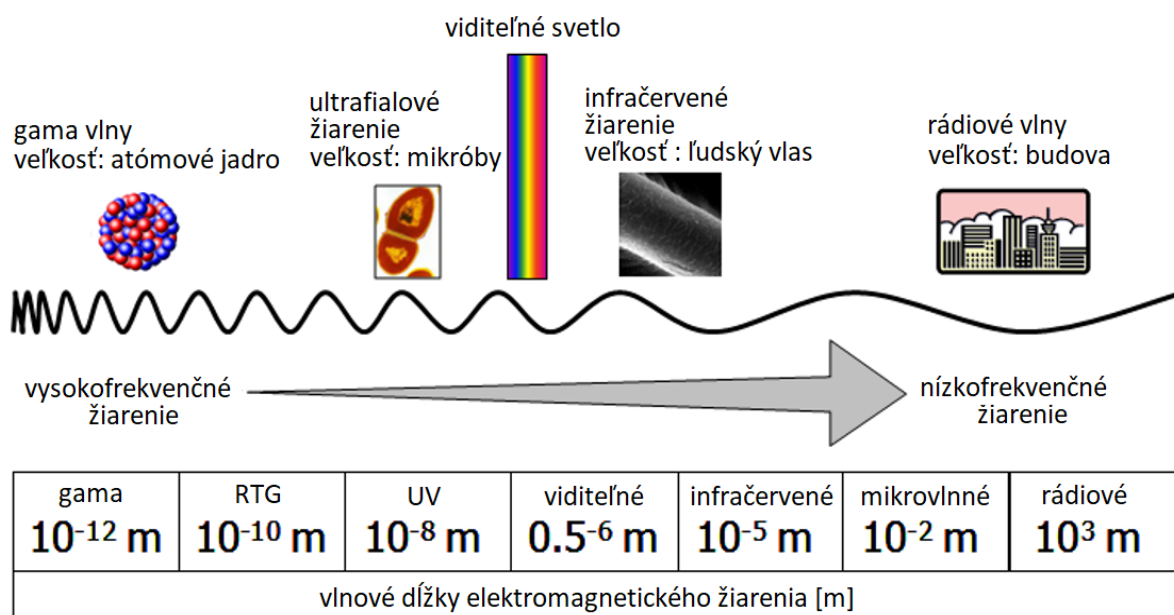
Na pozorovanie nekovových inklúzií, trhlín, pórov sa používajú **leptané/neleptané** metalografické vzorky.

Na pozorovanie hraníc zŕn, segregácie, tvaru, veľkosti a rozloženia fáz a deformácie sa používajú **leptané/neleptané** metalografické vzorky.

## Téma č. 4: ŠTÚDIUM MIKROŠTRUKTÚRY KOVOV. SVETELNÁ MIKROSKOPIA

Mikroštruktúra kovov a zliatin sa zvyčajne pozoruje na pripravených metalografických rezoch pomocou svetelných (optických) mikroskopov. Svetelné mikroskopy využívajú na zobrazenie mikroštruktúry usmernený svetelný lúč.

Viditeľné svetlo zaberá veľmi úzku časť v spektre vlnových dĺžok elektromagnetického žiarenia - 400-700nm, a nachádza sa medzi UV a IR žiarením, obr. 4.1. Prirodzené svetlo je komplexná zmes žiarení s rôznymi vlnovými dĺžkami. Takmer všetky svetelné zdroje poskytujú zmes vlnových dĺžok svetla.



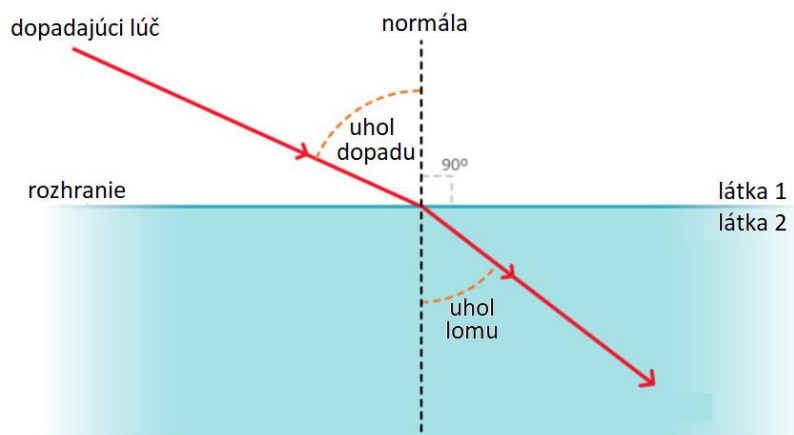
Obr. 4.1 Spektrum vlnových dĺžok elektromagnetického žiarenia

Na zobrazenie štruktúry materiálov pomocou optických mikroskopov sa využívajú tieto vlastnosti svetla:

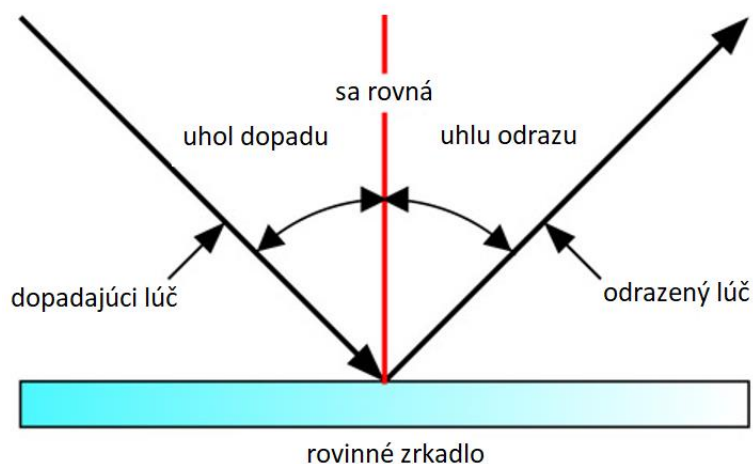
**Lom** – je zmena smeru svetla a súčasne jeho spomalenie, keď svetlo prechádza optickým rozhraním, teda vstupuje do iného prostredia, a to pod iným ako pravým uhlom, obr. 4.2. Tento jav nastáva aj pri prechode svetla zakrivenou šošovkou objektívu, pričom určujúci je uhol dopadu svetla, index lomu a zakrivenie (geometria) šošovky.

**Odraz** – nastáva, keď sa svetlo odrazí od iného objektu. Ak je povrch objektu hladký a lesklý, napr. ako sklo, vodná hladina alebo leštený kov, svetelný lúč sa odrazí pod rovnakým uhlom, pod akým na objekt dopadol, obr. 4.3.

Uvedené vlastnosti svetla tvoria základ činnosti svetelných (optických) mikroskopov.



Obr. 4.2 Princíp lomu svetla



Obr. 4.3 Princíp odrazu svetla

Svetelný mikroskop využíva viditeľné svetlo a systém šošoviek na vizualizáciu malých objektov. Metalografický mikroskop pomáha určiť:

- veľkosť a tvar zrna
- veľkosť, tvar a rozloženie rôznych fáz a inklúzií
- mechanické a tepelné spracovanie zliatin

V súčasnosti je na trhu veľké množstvo optických mikroskopov rôznych veľkostí, konštrukcie, s rôznym zväčšením, rozlíšením, atď.

Princíp činnosti optického systému metalografického mikroskopu je vysvetlený na obr. 4.4.

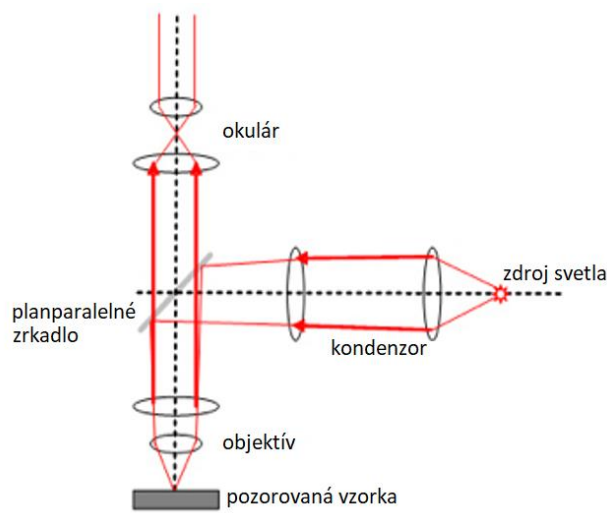
Princíp zobrazenia objektov spočíva v pozorovaní svetla odrazeného od vzorky.

#### **Dráha lúča mikroskopom:**

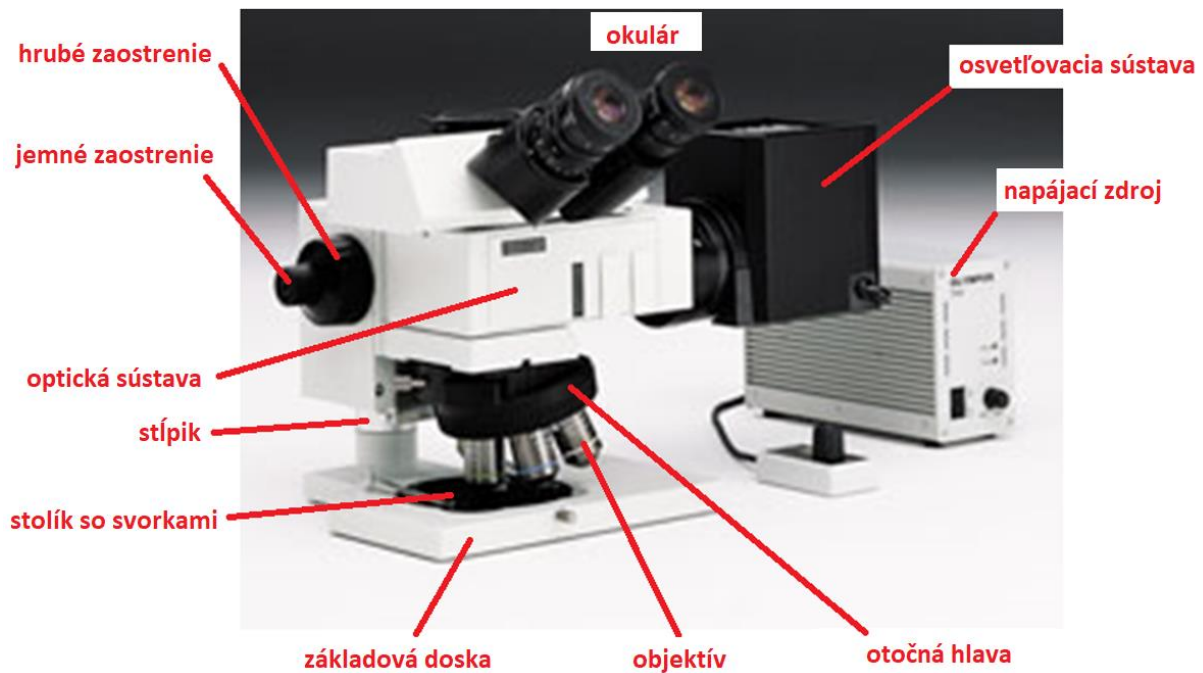
- zo zdroja svetla (zdroj studeného svetla - LED)
- cez rôzne typy šošoviek, ktoré ktorá menia divergentný lúč z bodového zdroja na rovnobežný alebo zbievavý lúč na osvetlenie objektu

- na planparalelné zrkadlo, ktoré zabezpečuje zmenu smeru svetla
- cez objektív, ktorý sústreďuje svetlo do jedného bodu
- na vzorku
- odráža sa od vzorky
- do okuláru, kde pozorujeme zväčšený zaostrený obraz vzorky.

Na obr. 4.5 je uvedený typický optický metalografický mikroskop a jeho hlavné časti.



Obr. 4.4 Prechod svetelného lúča mikroskopom



Obr. 4.5 Typický svetelný metalografický mikroskop, hlavné časti

## Mechanické časti mikroskopu a ich funkcia:

- **Základová doska** – nosná kovová spodná časť, podopierajúca mikroskop
- **stĺpik** – nesie ostatné časti mikroskopu; časť, za ktorú sa drží mikroskop pri prenášaní
- **stolík** – platforma, na ktorej je umiestnený pozorovaný predmet
- **svorky** – zaisťujú polohu objektu na stolíku
- **Otočná hlava** – otočný kotúč, na ktorom sú upevnené objektívy
- **Hrubé zaostrenie** – otáčaním dvíha alebo spúšťa optickú sústavu, kým sa objekt nedostane do polohy približného zaostrenia
- **Jemné zaostrenie** – otáčaním privádza objekt do dokonalého zaostrenia

### Zväčšujúce časti mikroskopu a ich funkcia:

- **objektív** – je sada šošoviek, ktorá zabezpečuje zväčšenie pozorovaného objektu. Zväčšenie objektívov svetelných mikroskopov sa pohybuje od 5× do 50×.
- **okulár** – sada šošoviek v hornej časti mikroskopu, ktorá ďalej zväčšuje obraz zväčšený objektívom. Zväčšenie okulárov svetelných mikroskopov sa zvyčajne pohybuje od 5× do 15×)

Keďže úlohou mikroskopu je zväčšiť pozorovaný obraz, zväčšenie je dôležitou charakteristikou mikroskopu. **Zväčšenie** znamená pomer veľkosti zväčšeného a pôvodného obrazu. Celkové zväčšenie obrazu je súčinom zväčšenia objektívu a okuláru:

**Celkové zväčšenie = zväčšenie objektívu x zväčšenie okuláru**

**Maximálne zväčšenie** dosiahnuteľné pomocou optického mikroskopu je približne 1000×, maximálne teoretické zväčšenie je asi 2 000×, no to už naráža na fyzikálne bariéry kvôli obmedzeniu dĺžky svetelných vln.

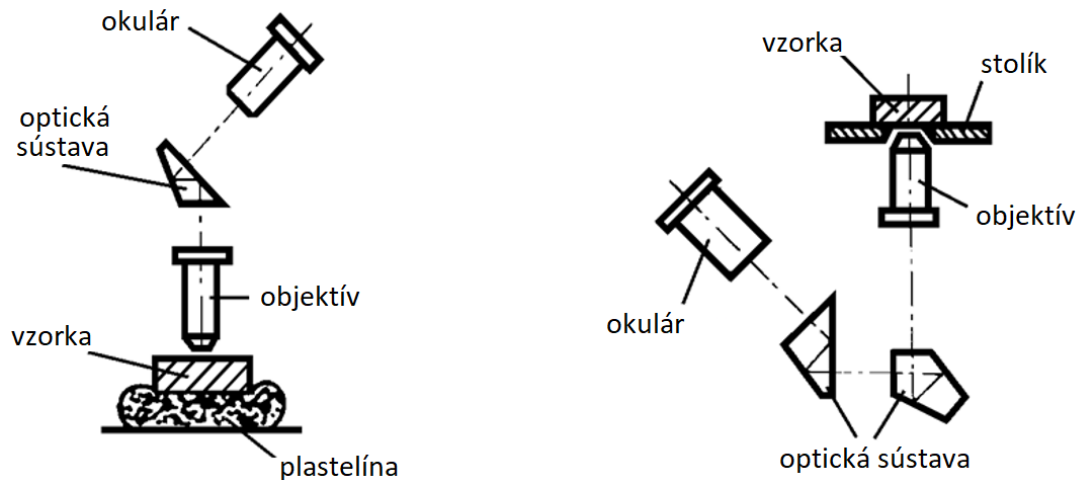
Ďalšou dôležitou vlastnosťou mikroskopu je rozlíšenie. **Rozlíšenie** je minimálna vzdialenosť medzi dvoma bodmi, kedy ich pozorovateľ dokáže ešte vnímať oddelene.

Metalurgický mikroskop môže mať aj obrátený dizajn. Potom sa nazýva invertovaný mikroskop, obr. 4.6.



Obr. 4.6 Invertovaný (obrátený) optický mikroskop

Obr. 4.7 uvádza schému normálneho a invertovaného metalografického mikroskopu.



Obr. 4.7 Konštrukčné usporiadanie normálneho a obráteného metalografického mikroskopu

V tab. 4.1 sú uvedené výhody a nevýhody normálneho a obráteného metalografického mikroskopu z pohľadu používateľa.

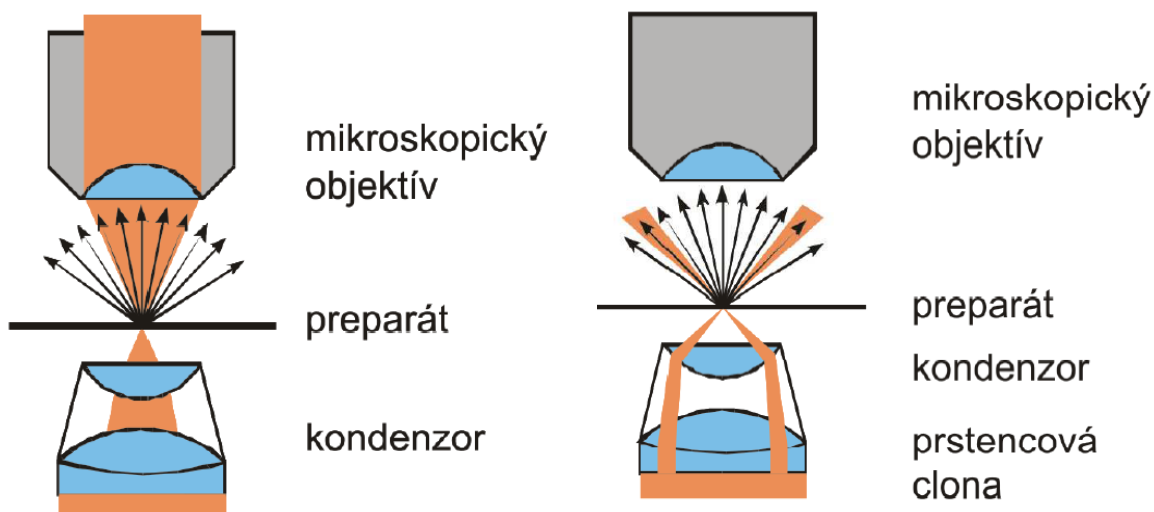
Tab. 4.1 Výhody a nevýhody normálneho a obráteného metalografického mikroskopu

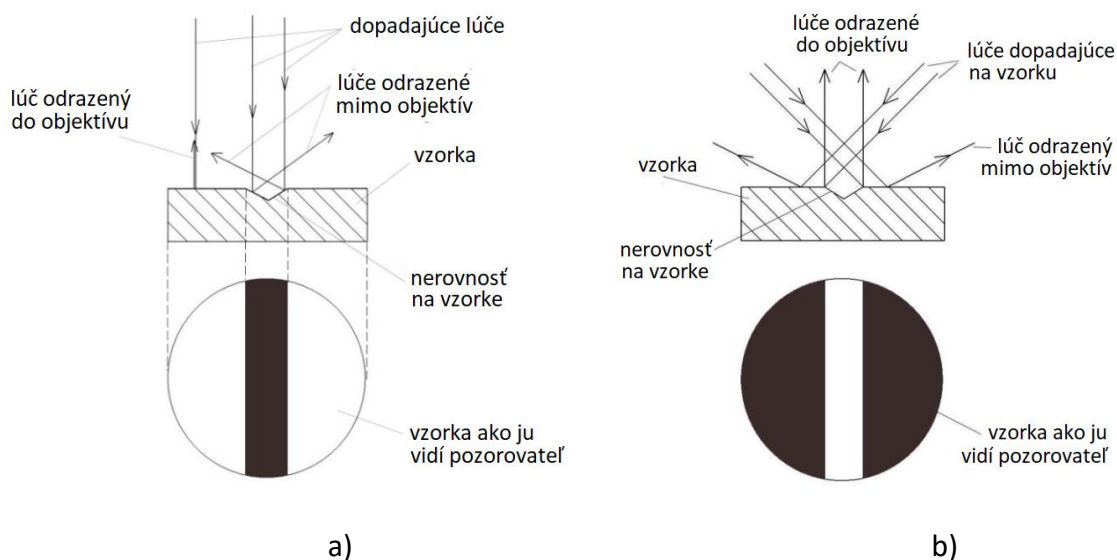
|                 | Normálny mikroskop                                                                                                                                                                                               | Obrátený mikroskop                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Výhody</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>základňa so stolíkom mikroskopu je masívna, je možné pozorovať ťažké vzorky</li> <li>vďaka svetelnej škvrne na vzorke je možné identifikovať pozorované miesto</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vzhľadom na nastaviteľnú vzdialenosť medzi objektívom a stolíkom je možné pozorovať vzorky väčších rozmerov</li> </ul>                                                                                                          |
| <b>Nevýhody</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vzhľadom na malú vzdialenosť medzi objektívom a stolíkom je možné pozorovať len vzorky s malou výškou</li> </ul>                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>aby sa zabránilo poškodeniu stolíka, hmotnosť pozorovaného objektu je obmedzená</li> <li>pri veľkom zväčšení je objektív veľmi blízko k vzorke, nie je vidieť svetelnú škvrnu, nie je možné určiť miesto pozorovania</li> </ul> |

### Metódy pozorovania v svetlom a tmavom poli

Základným princípom **metódy svetlého poľa** je podmienka sústrediť všetko nerozptýlené (nedifragované) svetlo do objektívu, obr. 4.8a. Tento spôsob osvetlenia sa dá využiť aj pre odrážajúce nepriehľadné objekty. Kontrast obrazu, ktorý je potrebný aby sme rozlíšili jednotlivé plochy, hrany a detaily predmetu, sa v tomto prípade vytvára na základe rôznej amplitúdovej priepustnosti týchto detailov a tiež na základe rôznych farebných odtieňov predmetu. Pozadie obrazu pri pozorovaní je v tomto prípade presvietené. Je to najbežnejší spôsob mikroskopického pozorovania.

Mikroskopická štruktúra mnohých predmetov, či už biologických alebo aj metalografických, vyžaduje sledovanie najjemnejších detailov. Pri metóde svetlého poľa množstvo svetla, ktoré vniká do oka, pôsobí rušivo a najmenšie štruktúry sú zle viditeľné. Vtedy je výhodnejšie použiť **pozorovanie v tmavom poli**, pri ktorom sa využívajú lúče difúzne odrazené od objektu, obr. 4.8b. Podstata pozorovania v tmavom poli spočíva v tom, že predmet osvetľujeme šikmými lúčmi tak, aby priamo prechádzajúce alebo zrkadlovo odrazené lúče nevnikali priamo do objektívu. Ak dopadnú šikmé lúče na nejakú drobnú štruktúru objektu, lomí sa a rozptyľujú a ich časť sa takto dostáva do zorného poľa objektívu. Jemná štruktúra predmetu, jeho hrany, bodové detaily a nehomogenity potom intenzívne žiaria na tmavom poli. Platí pritom, čím jemnejšia štruktúra, tým intenzívnejší rozptyl svetla a dobrá viditeľnosť na tmavom pozadí. Ak objekt chýba, lúče ktoré idú z osvetľujúceho systému sa do objektívu nedostanú a zorné pole sa javí celé tmavé.



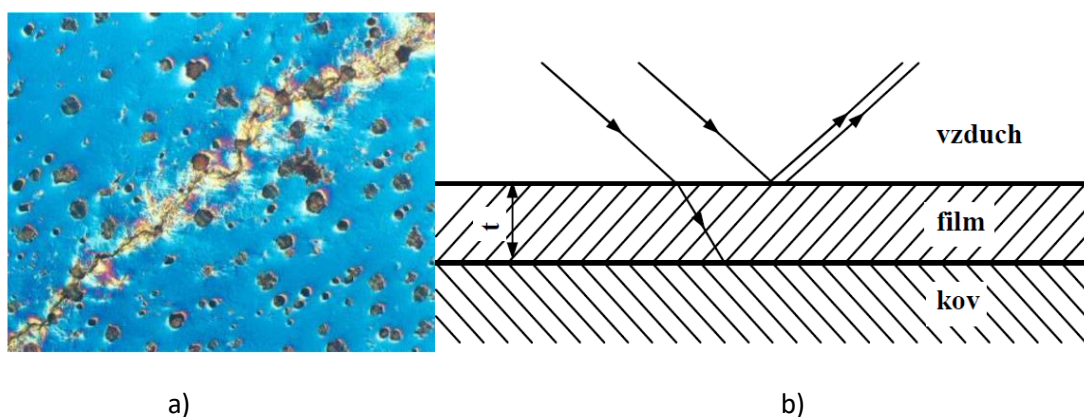


Obr. 4.8 Princíp pozorovania v a) svetlom poli, b) tmavom poli

### Metóda diferenciálneho interferenčného kontrastu

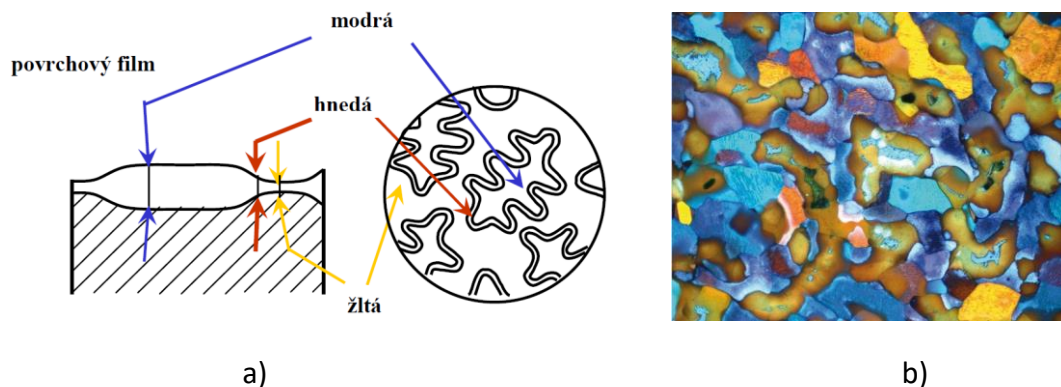
Je založená na fakte, že svetelné vlny odrazené od nerovnosti povrchu sa odlišujú v amplitúdach, alebo v intenzite. Metódu je vhodné použiť pri zviditeľnení nepatrných stupňov a nerovností. Princíp spočíva v jave interferencie lúčov, ktoré vytvárajú dva mierne posunuté obrazy povrchu - každý bod objektu zobrazujú dva lúče. Diferenciálny interferenčný kontrast zvyšuje relatívne výškové nerovnosti povrchu, zvýrazňuje hranice zŕn a ťažko leptateľné intermediárne fázy.

Pre zvýraznenie odlišnej odrazivosti svetla na jednotlivých fázach sa na povrch môžu naniesť **interferenčné vrstvy naparovaním**, obr. 4.9. Odlišné fázy majú odlišné spektrum odrazeného svetla s iným charakteristickým minimom vlnovej dĺžky. Keďže sú vlnové dĺžky rôzne, majú v odrazenom svetle odlišnú farbu, ktorá je podstatou odlišenia fáz pri metalografickom rozbere. Metóda je vhodná hlavne na detailnejšie štúdium inklúzií.



Obr. 4.9 a) únavová trhlina v bainitickej liatine s guľôčkovým grafitom, pozorovaná pomocou diferenciálneho interferenčného kontrastu, b) schéma interferencie lúčov odrazených od povrchu s naparenou interferenčnou vrstvou

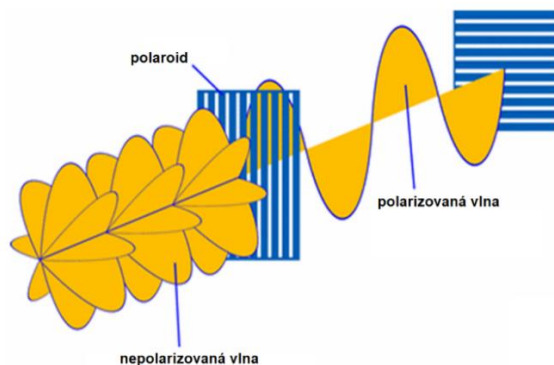
Najdôležitejší spôsob zvýšenia interferenčného kontrastu je **farebné leptanie**, obr. 4.10. Princíp spočíva v chemickej reakcii povrchu metalografického výbrusu s leptadlom, výsledkom ktorého je transparentný film premenlivej hrúbky, ktorý má funkciu interferenčného povlaku. Pri pozorovaní vzorky s transparentným filmom vzniká interferencia svetla v dôsledku rozdelenia odrazeného svetla na zložky odrazené na rozhraní vzduch – vrstva a kov – vrstva.



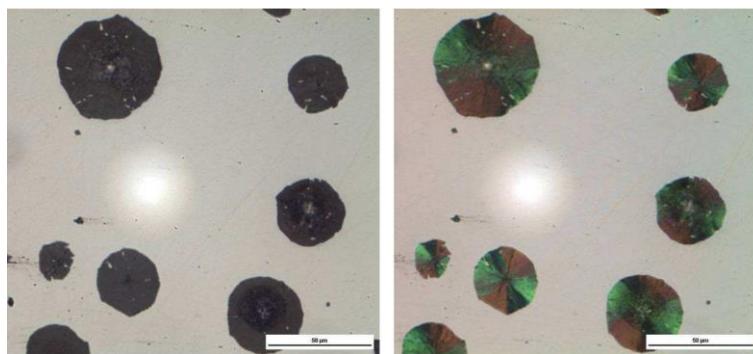
Obr. 4.10 a) Princíp vzniku kontrastu pri farebnom leptaní, b) zviditeľnenie koncentračných rozdielov v cínovom bronz

### Pozorovanie v polarizovanom svetle

Polarizované svetlo je svetlo s definovanou polohou rovín kmitov. Ide o lineárne polarizované svetlo, ktoré sa získa z nepolarizovaného svetla prechodom cez dvojlomné látky, ktoré rozdelia dopadajúci lúč na dva polarizované lúče, obr. 4.11. Lineárne polarizované svetlo pre mikroskopické pozorovanie sa získava pomocou nikolu – upraveného dvojlomného kryštálu islandského vápenca. Pri pozorovaní pomocou polarizovaného svetla je dôležité pripraviť kvalitné vzorky bez nerovností a znečistení, pretože tie ovplyvňujú polarizáciu odrazom a potláčajú efekty anizotropie. Povrchový reliéf vzorky, leptaný pre klasické postupy pozorovania je možné v polarizovanom svetle zvýrazniť. Polarizované svetlo sa používa pri podrobnom štúdiu ťažko leptateľných anizotropných fáz, napr. grafitu a cementitu, obr. 4.12. Hlavný význam pozorovania v polarizovanom svetle spočíva vo väčšej možnosti odlíšenia štruktúrnych zložiek v zmesiach fáz.



Obr. 4.11 Princíp polarizácie svetla



a) pozorovanie v svetlom poli

b) polarizované svetlo

Obr. 4.12 Gulôčkový grafit, neleptané

### Úlohy:

- pomenujte základné časti metalografického mikroskopu



- Doplňte chýbajúce slová v definíciách:

Pomer zväčšeného obrazu k pôvodnému obrazu sa nazýva .....

Celkové zväčšenie, ak poznáme zväčšenie objektívu a okuláru sa vypočíta nasledovne:

Celkové zväčšenie = .....

Minimálna vzdialenosť medzi dvoma bodmi, kedy je možné vnímať ich oddelene, sa nazýva .....

## ➤ Priradte výhody a nevýhody k normálnemu/obrátenému mikroskopu:

|  |                                                                                                             |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | vďaka svetelnej škvrne na vzorke je možné identifikovať pozorované miesto                                   |
|  | Vzhľadom na nastaviteľnú vzdialenosť medzi objektívom a stolíkom je možné pozorovať vzorky väčších rozmerov |
|  | Vzhľadom na malú vzdialenosť medzi objektívom a stolíkom je možné pozorovať len vzorky s malou výškou       |
|  | aby sa zabránilo poškodeniu stolíka, hmotnosť pozorovaného objektu je obmedzená                             |

## Téma č. 5: ZOSTROJENIE ROVNOVÁŽNYCH DIAGRAMOV KOVOVÝCH SÚSTAV

Problematika rovnováhy fáz a rovnovážnych diagramov (nazývané tiež fázové) úzko súvisí s termodynamikou materiálov. Podľa Gibbsona ak je sústava v celom objeme jednoliata a to nielen po stránke chemického zloženia ale aj po stránke fyzikálneho stavu, hovoríme, že je homogénna alebo že sa skladá z jednej fázy.

Zliatina je kovový materiál, skladajúci sa z dvoch alebo viacerých zložiek (za zložku alebo komponentu považujeme chemicky čisté látky), v ktorom prevažujúcou zložkou je kov. Podľa štruktúry môžu byť zliatiny **homogénne (jednofázové)** alebo **heterogénne (viacfázové)** sústavy. Jednofázové zliatiny majú štruktúru tuhého roztoku alebo intermediárnej fázy. Viacfázové zliatiny sú tvorené mechanickou zmesou kryštálov čistých kovov, tuhých roztokov alebo intermediárnych fáz.

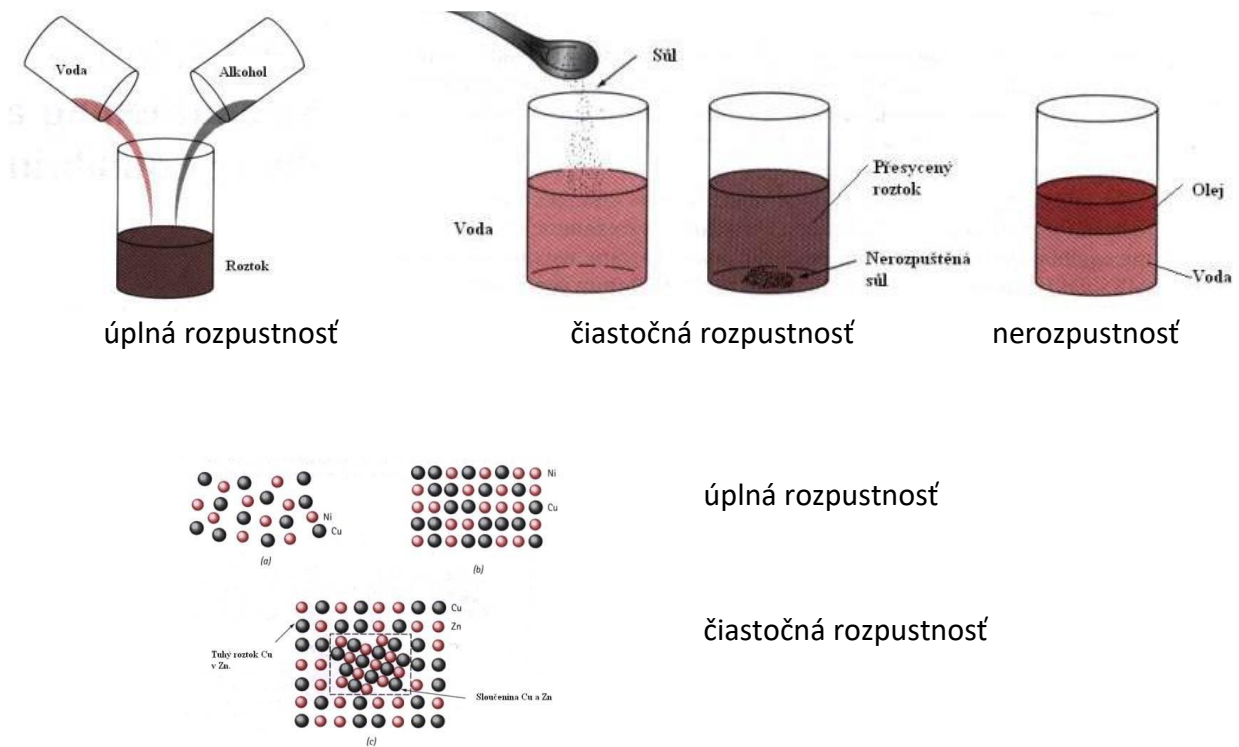
Kryštalizáciu zliatin sledujeme pomocou rovnovážnych diagramov. Zobrazujú sa v súradniciach teplota – chemické zloženie (koncentrácia prvkov) a udávajú fázovú rovnováhu **binárnych (dvojjložkových) zliatin** pre všetky koncentrácie týchto zložiek v závislosti od teploty. Rovnovážne diagramy sa konštruujú pomocou termickej analýzy na základe zistených teplôt fázových premien zliatin s rôznym vzájomným pomerom zložiek.

V sústavách kovov sú zložky v tekutom stave dokonale rozpustné a tvoria jednu homogénnu fázu – **taveninu**. V tuhom stave je ich vzájomná rozpustnosť rôzna a môže sa jednať o

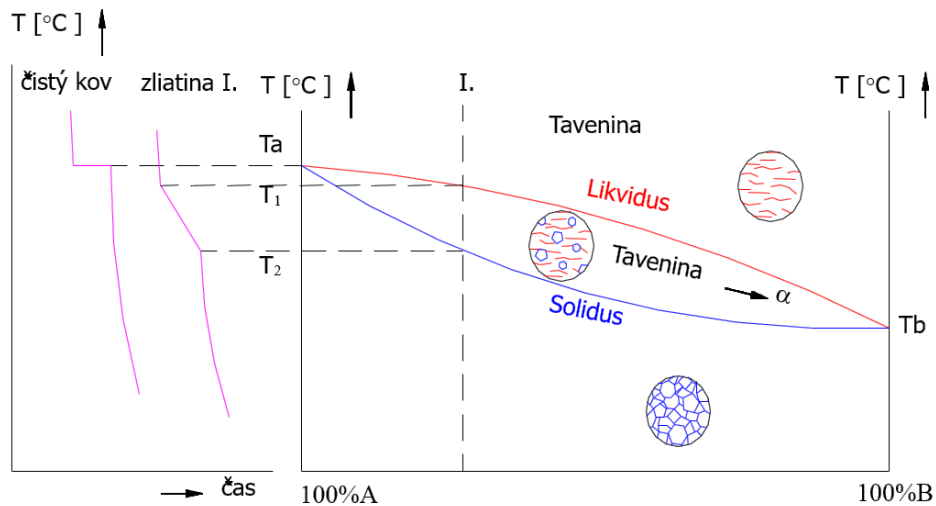
- dokonalú (úplnú) rozpustnosť,
- čiastočnú (neúplnú, obmedzenú) rozpustnosť,
- dokonalú (úplnú) nerozpustnosť, obr. 5.1.

Binárne diagramy (u dvojjložkových zliatin) sa konštruujú do súradnicového systému, kde na vodorovnej osi je chemické zloženie a na zvislej sú teploty. Ich rozbor umožňuje určiť štruktúru zliatiny daného zloženia a pri danej teplote a tým aj očakávané vlastnosti zliatiny. Poskytujú údaje, ktoré sú využiteľné pri rôznych technológiách výroby strojných súčastí. Všetky zliatiny kryštalizujú v teplotnom rozmedzí.

V diagrame je možné identifikovať dve významné teplotné krivky, obr. 5.2, krivku **likvidus** – spojnice bodov určujúcich začiatok tuhnutia a krivku **solidus** - spojnice bodov určujúcich ukončenie tuhnutia. Nad čiarou likvidus sú zliatiny vždy v kvapalnom stave, pod čiarou solidus sú vždy v tuhom stave, medzi čiarami likvidus a solidus vedľa seba existujú kvapalná i tuhá fáza.

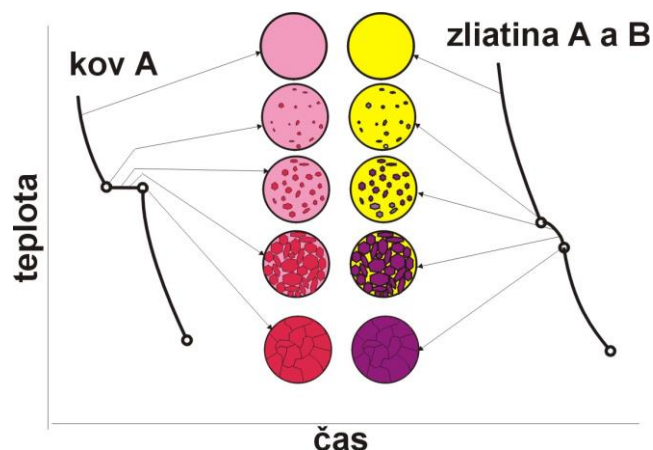


Obr. 5.1 Znázornenie vzájomnej rozpustnosti dvoch zložiek



Obr. 5.2 Rovnovážny binárny diagram dvoch zložiek A a B s dokonalou rozpustnosťou s vyznačením kriviek solidus a likvidus

Priebeh kryštalizácie znázorňujeme pomocou **kriviek ochladzovania**, ktoré sa konštruujú ako závislosť teploty (zvislá os) od času (vodorovná os). Zo zlomov na krivke možno určiť teplotu začiatku a konca kryštalizácie. Priebeh kryštalizácie čistého kovu a zliatiny je odlišný, obr. 5.3. Kým u čistého kovu je začiatok a koniec kryštalizácie na úrovni jednej teploty, u zliatiny je to v rozmedzí dvoch teplôt.



Obr. 5.3 Priebeh kryštalizácie čistého kovu A a zliatiny AB

Podľa Rosembooma môžeme na základe rozpustnosti základných zložiek v tekutom a tuhom stave rovnovážne diagramy binárnych zliatin zatriediť do týchto základných typov:

1. s úplnou rozpustnosťou zložiek v tekutom aj tuhom stave,
2. zložky rozpustné v tekutom stave, nerozpustné v tuhom stave,
3. s úplnou rozpustnosťou zložiek v tekutom stave a s obmedzenou rozpustnosťou v tuhom stave.

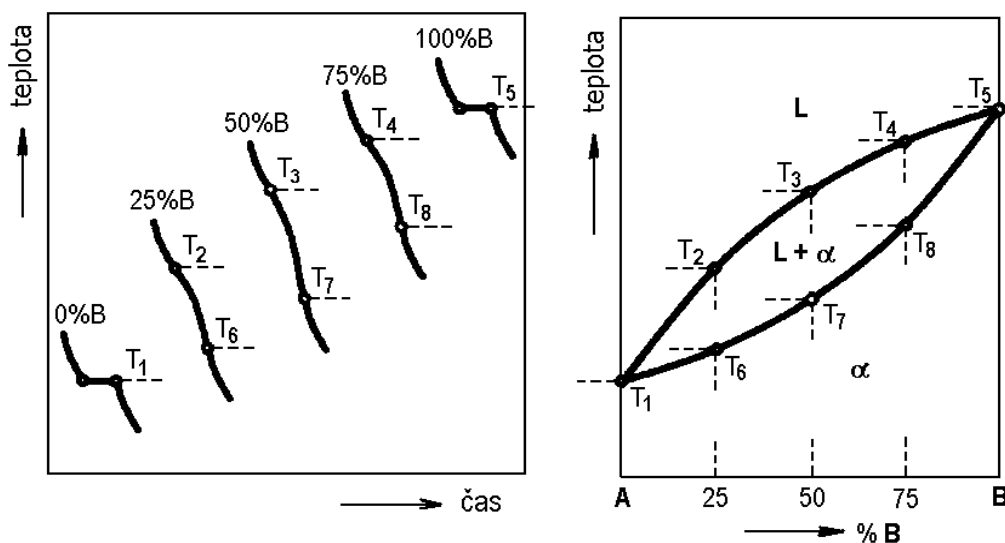
### **1. Rovnovážny diagram zložiek úplne rozpustných v tekutom aj tuhom stave**

Konštrukcia rovnovážneho diagramu je na obr.5.4. Ide o zliatinu dvoch zložiek, ktoré sú v tekutom aj tuhom stave dokonale rozpustné a tvoria neohraničený tuhý roztok  $\alpha = A_{(B)} = B_{(A)}$ . Tento tuhý roztok je jedna fáza s dvomi zložkami. Na ľavej strane obrázku sú uvedené krivky ochladzovania vhodne volených zliatin s vyznačenými teplotami začiatku a konca kryštalizácie.

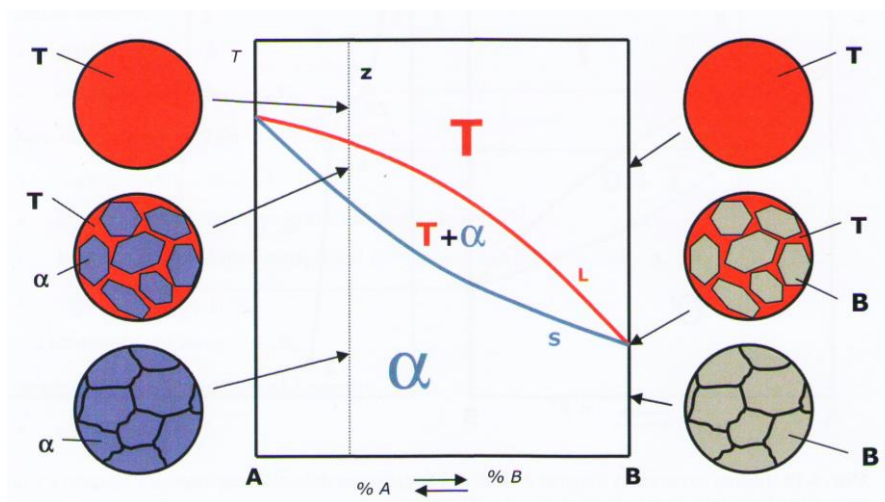
Pri čistých kovoch - 100%A, 100%B kryštalizácia prebieha pri konštantnej teplote. Vynesením a spojením teplôt začiatku kryštalizácie ( $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$ ) do diagramu v súradniciach teplota – zloženie, získame čiaru likvidus, nad ktorou je tavenina - L. Spojením bodov ukončenia kryštalizácie ( $T_1, T_6, T_7, T_8, T_5$ ) dostaneme čiaru solidus, pod ktorou je len tuhá fáza -  $\alpha$ . Medzi krivkami likvidus a solidus existuje vedľa seba tekutá aj tuhá fáza L +  $\alpha$ .

Schematické znázornenie jednotlivých štruktúr zliatiny, zloženej zo zložky A a B, ktoré sú navzájom úplne rozpustné v tekutom aj v tuhom stave je uvedené na obr. 5.5. Nad čiarou

likvidus sa nachádza tavenina – T. V rozmedzí teplôt likvidu a solidu dochádza ku ochladzovaniu taveniny a súčasne ku kryštalizácii, vzniká tuhý roztok  $\alpha$ . Pod teplotou solidus už je kryštalizácia ukončená a finálnou fázou je tuhý roztok  $\alpha$ .



Obr.5.4 Konštrukcia rovnovážneho diagramu



Obr. 5.5 Znáznornenie jednotlivých štruktúr zliatiny, zloženej zo zložky A a B, ktoré sú navzájom úplne rozpustné v tekutom aj v tuhom stave

## **2. Rovnovážny diagram zložiek úplne rozpustných v tekutom stave a úplne nerozpustných v tuhom stave**

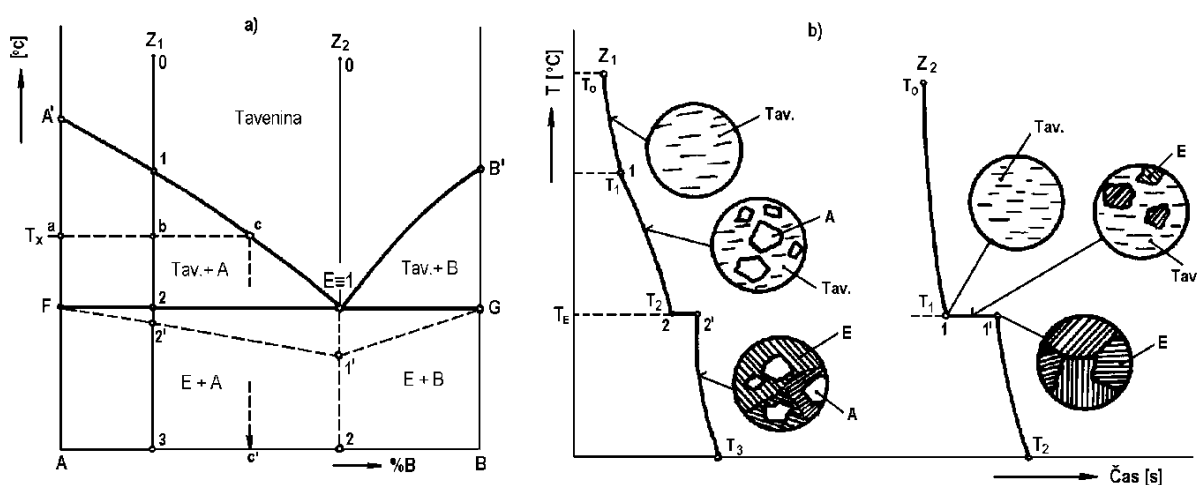
Základný typ tohto diagramu je uvedený na obr.5.6 (tvoria ho napríklad zložky Sn-Zn, Pb-Sn, Al-Si, Ag-Pb, Cd-Sn). Pre diagram je charakteristická eutektická reakcia, pre ktorú platí  $v = 0$ ,  $T = \text{konšt.}$ , kde  $v$  – je stupeň voľnosti sústavy vypočítaný z *Gibbsovoho zákona fáz*:

$$v = k + 1 - f \quad (5.1)$$

kde  $k$  – počet zložiek (komponent),  $f$  – počet fáz.

Bod E je eutektickým bodom, krivka ÁEB' je krivkou začiatku kryštalizácie (likvidus), čiara FG je eutektická čiara (teplota) a súčasne je aj čiarou konca kryštalizácie (solidus). Trojuholník F1'G je tzv. *Tammanov trojuholník*, ktorého výška pre zvolenú zliatinu (napr. pre zliatinu  $Z_1$ , výška 22') udáva dĺžku zádržnej čiary pri eutektickej reakcii, ktorú môžeme vyjadriť vzťahom:

$$T_{(E)} \leftrightarrow A_{(F)} + B_{(G)} \quad (5.2)$$



Obr.5.6 Rovnovážny diagram s nulovou rozpustnosťou zložiek v tuhom

Slovná formulácia vzťahu (5.2): Tavenina eutektického zloženia tuhne pri konštantnej teplote pri súčasnom vylučovaní dvoch fáz (kryštálov kovu A o zložení danom bodom F, a kovu B o zložení G) na mechanickú zmes – eutektikum (lamelárne, globulárne a iné). Popis zvolených kriviek ochladzovania je nasledovný (obr.5.6):

Zliatina  $Z_1$ : Medzi teplotami  $T_0$  a  $T_1$  prebieha ochladzovanie taveniny. Pod teplotou  $T_1$  sa začínajú z taveniny vylučovať prvé kryštáliky zložky A. Je to proces monovariantný ( $v=1$ ). Pri teplote  $T_x$  je pomer množstva taveniny  $Q_T$  a tuhej fázy  $Q_\alpha$  daný *pákovým pravidlom*:

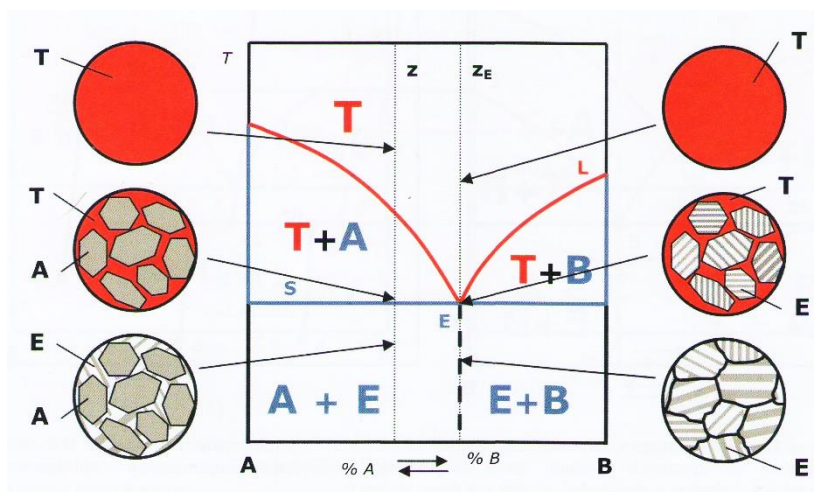
$$Q_T / Q_\alpha = ab / bc \quad (5.3)$$

Pri kryštalizácii tuhej fázy sa jej chemické zloženie mení po čiare likvidus a zloženie zvyšnej taveniny po čiare solidus. Zloženie taveniny pri teplote  $T_x$  je dané potom bodom c. Pri teplote  $T_2 = T_E$  chemické zloženie zvyšnej taveniny dosiahne eutektické zloženie dané bodom E a dôjde k eutektickej kryštalizácii, ktorá prebieha nonvariantne ( $v = 0$ ). Eutektikum  $E = A + B$  vzniká striedavým vylučovaním zložiek A a B a je mechanickou zmesou. Od teploty  $T_2 = T_E$  až

po teplote okolia ( $T_3$ ) prebieha len ochladzovanie zliatiny. Výsledná štruktúra bude tvorená zrnami zložky A a zrnami eutektika E.

Zliatina  $Z_2$ : Táto zliatina je eutektická. Medzi teplotami  $T_0$  a  $T_1$  prebieha ochladzovanie taveniny. Pri teplote  $T_1 = T_E$  nastáva eutektická reakcia. Dĺžka zádržnej čiary je maximálna (11'). Pod teplotou  $T_E$  sa eutektikum voľne ochladzuje. Mikroštruktúra zliatiny  $Z_2$  bude tvorená zrnami eutektika E – eutektická štruktúra.

Na obr. 5.7 je schematické znázornenie jednotlivých štruktúr zliatiny, zloženej zo zložky A a B, ktoré sú navzájom úplne rozpustné v tekutom a úplne nerozpustné v tuhom stave.



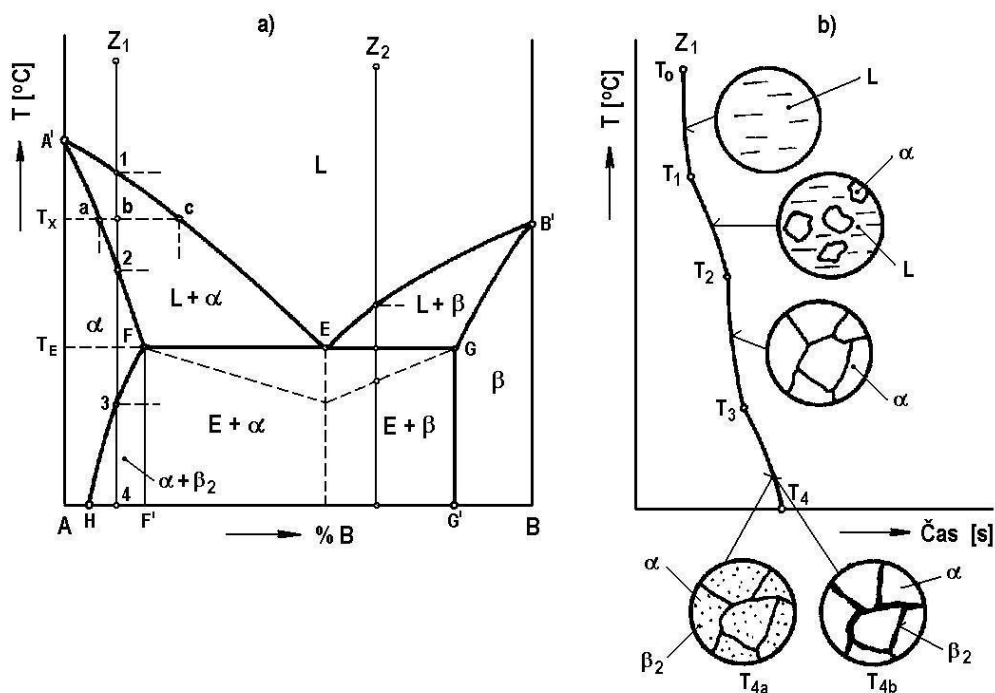
Obr. 5.7 Schematické znázornenie štruktúr zliatiny, zloženej zo zložky A a B, ktoré sú navzájom úplne rozpustné v tekutom a úplne nerozpustné v tuhom stave

Nad čiarou likvidus sa nachádza tavenina – T. V rozmedzí teplôt likvidu a solidu dochádza ku ochladzovaniu taveniny a súčasne ku jej kryštalizácii, postupne vznikajú v tavenine kryštály čistej zložky A alebo B. V úrovni teploty solidu dochádza k eutektickej reakcii a vzniku eutektika E, ktorého štruktúra je tvorená striedavým vylučovaním čistých zložiek A a B z taveniny. Po ukončení kryštalizácie nasleduje ochladzovanie (pod teplotu solidu) produktov kryštalizácie, t.j. kryštálov čistej zložky A (alebo B) a eutektika. V prípade kryštalizácie taveniny s eutektickým zložením (bod E), je zliatina tvorená len jednou zložkou – eutektikom.

### **3. Rovnovážny diagram zložiek úplne rozpustných v tekutom stave a s obmedzenou rozpustnosťou v tuhom stave**

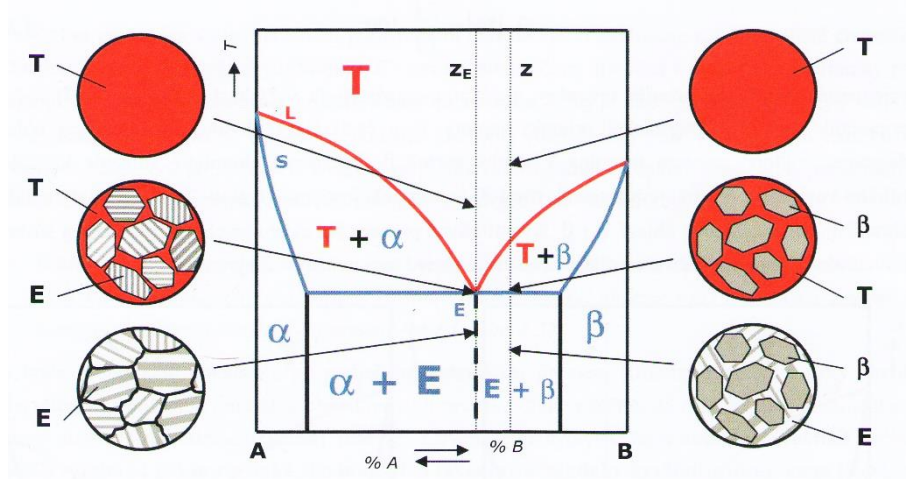
Keď zložky sú len obmedzene rozpustné, hovoríme o obmedzených tuhých roztokoch. Tento typ diagramu vytvárajú zložky: Ag-Cu, Ag-Pb, Bi-Sb, Cu-Pb, Mo-Ti, Sn-Sb, atď. Príklad takého diagramu je na obr.5.8. Zložka A obmedzene rozpúšťa zložku B, čím vzniká tuhý roztok

$\alpha = A_{(B)}$  a podobne zložka B obmedzene rozpúšťa zložku A za vzniku tuhého roztoku  $\beta = B_{(A)}$ . Maximálna rozpustnosť zložky B v tuhom roztoku  $\alpha$  a zložky A v tuhom roztoku  $\beta$  je pri eutektickej teplote (bod F resp. bod G). S klesajúcou teplotou sa rozpustnosť B v  $\alpha$  znižuje podľa čiary FH. Krivka A'E'B' je likvidus, čiara A'FEGB' je solidus.



Obr.5.8 Rovnovážny diagram zložiek s obmedzenou rozpustnosťou v tuhom

Zliatina  $Z_1$ : Až po teplotu  $T_1$  sa tavenina voľne ochladzuje. Pod teplotou  $T_1$  začínajú sa z taveniny vylučovať prvé kryštály tuhého roztoku  $\alpha$ . Pri teplote  $T_2$  sa ukončí kryštalizácia a štruktúra zliatiny je tvorená len zrnami tuhého roztoku  $\alpha$ . Medzi teplotami  $T_2$  a  $T_3$  prebieha ochladzovanie tuhého roztoku  $\alpha$ . V bode 3 pretína zliatina  $Z_1$  krivku obmedzenej rozpustnosti a pod teplotou  $T_3$  dôjde k vylučovaniu tuhého roztoku  $\beta$  (sekundárne) po hraniciach zrn tuhého roztoku  $\alpha$ . Takto vylúčený tuhý roztok nazývame segregát alebo aj sekundárna fáza, preto sa označuje  $\beta_2$  (obr.5.8 –  $T_{4b}$ ). Rýchlym ochladením (kalením) z teploty nad  $T_3$  zamedzíme difúziu a tým aj vylučovaniu segregátu  $\beta_2$  a dostaneme presýtený tuhý roztok  $\alpha$ . Tento je termodynamicky nestabilný a má snahu dostať sa do rovnovážneho stavu. Pri miernom zvýšení teploty sa preto presýtený tuhý roztok  $\alpha$  rozpadá a dochádza k vylučovaniu častíc  $\beta_2$  (precipitátov) z presýteného tuhého roztoku v objeme zrn (obr.5.8 –  $T_{4a}$ ). Ide o proces, ktorý sa nazýva precipitácia.



Obr. 5.9 Schematické znázornenie štruktúr zliatiny, zloženej zo zložky A a B, ktoré sú navzájom úplne rozpustné v tekutom a obmedzene rozpustné v tuhom stave

Obr. 5.9 schematicky znázorňuje štruktúry zliatiny, zloženej zo zložky A a B, ktoré sú navzájom úplne rozpustné v tekutom a obmedzene rozpustné v tuhom stave. Nad čiarou likvidus sa nachádza tavenina – T. Medzi likvidom a solidom dochádza ku ochladzovaniu taveniny a súčasne ku jej kryštalizácii, postupne vznikajú v tavenine kryštály tuhých roztokov  $\alpha$  alebo  $\beta$ . Pri kryštalizácii na eutektikále (vodorovná časť solidu s bodom E) vzniká eutektikum striedavým vylučovaním kryštálov tuhých roztokov  $\alpha$  a  $\beta$  z taveniny, vytvára tzv. mechanická zmes s charakteristickou lamelárnou morfológiou. Po skončení ochladzovania je štruktúra zliatiny tvorená kryštálmi tuhého roztoku  $\alpha$  alebo  $\beta$  a eutektikom E. Pri koncentrácii eutektickej zliatiny je štruktúra tvorená len eutektikom E.

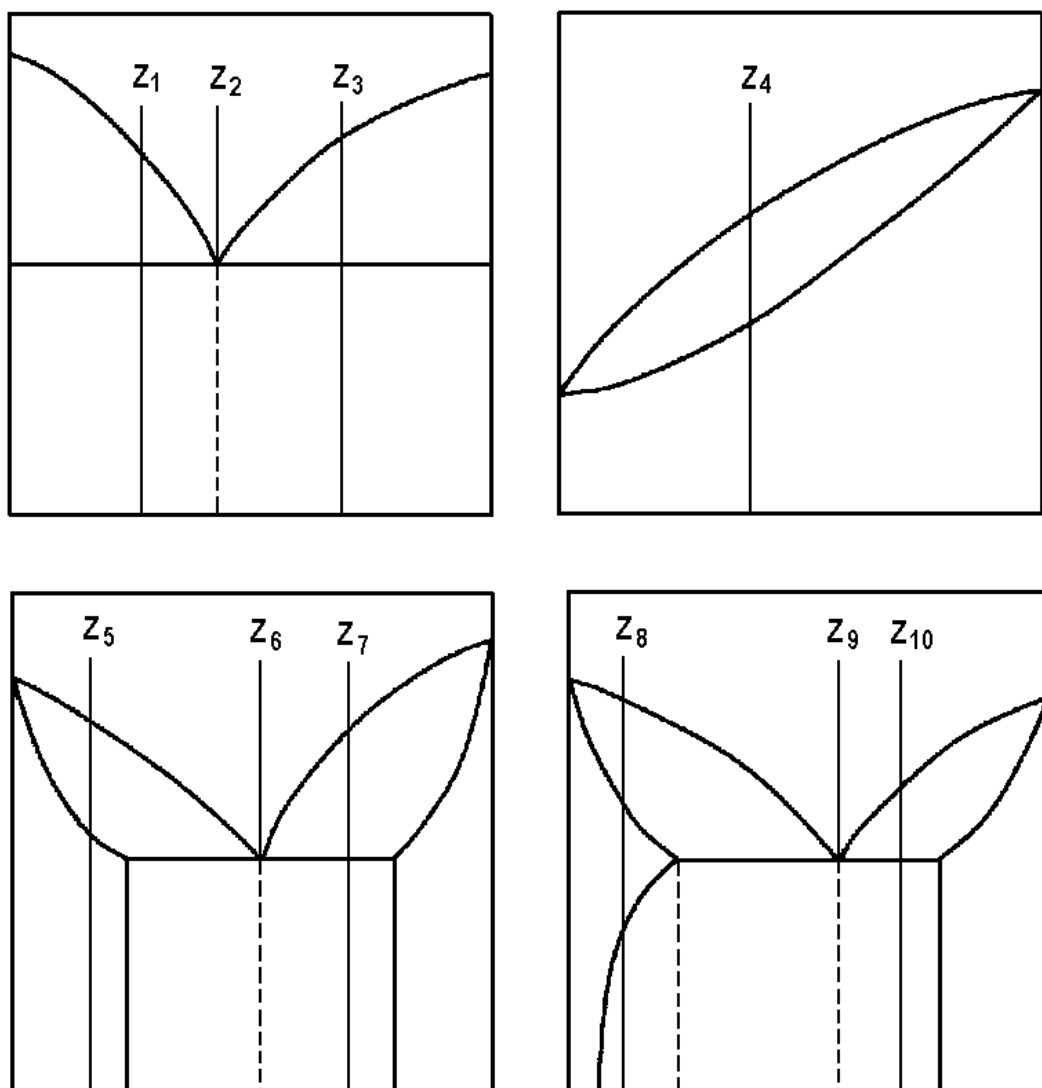
### **Uplatnenie základných rovnovážnych diagramov u reálnych sústav**

V skutočných sústavách sa často uplatňuje diagram s úplnou rozpustnosťou v tuhom stave (napr. Ni – Cu, Ag – Pd) ako aj diagram s obmedzenou rozpustnosťou s eutektickou reakciou zložiek, ktorých teploty tavenia sú si blízke (Ag – Cu, Bi – Sn).

Oproti tomu je úplná vzájomná nerozpustnosť zložiek u binárnych zliatin pomerne vzácna (napr. Ag – Si, Au – Si). Príčina je termodynamická. A vyplýva zo snahy sústav o zvýšenie ich entropie pri samovoľných dejoch a z vlastnosti entropie zväčšovať sa pri rastúcej neusporiadanosti sústavy. Diagram s úplnou nerozpustnosťou sa uplatňuje skôr v prípadoch, kedy je dielčou zložkou sústavy intermediálna fáza.

**Úlohy:**

1. Popíšte rovnovážne diagramy na obr.5.10.
2. Definujte zložky, fázy a štruktúrne zložky, ktoré sa vyskytujú v diagramoch na obr.5.10.
3. Nakreslite a opíšte krivky ochladzovania zliatin  $Z_1$  až  $Z_x$ , vyznačených v rovnovážnych diagramoch na obr. 5.10.



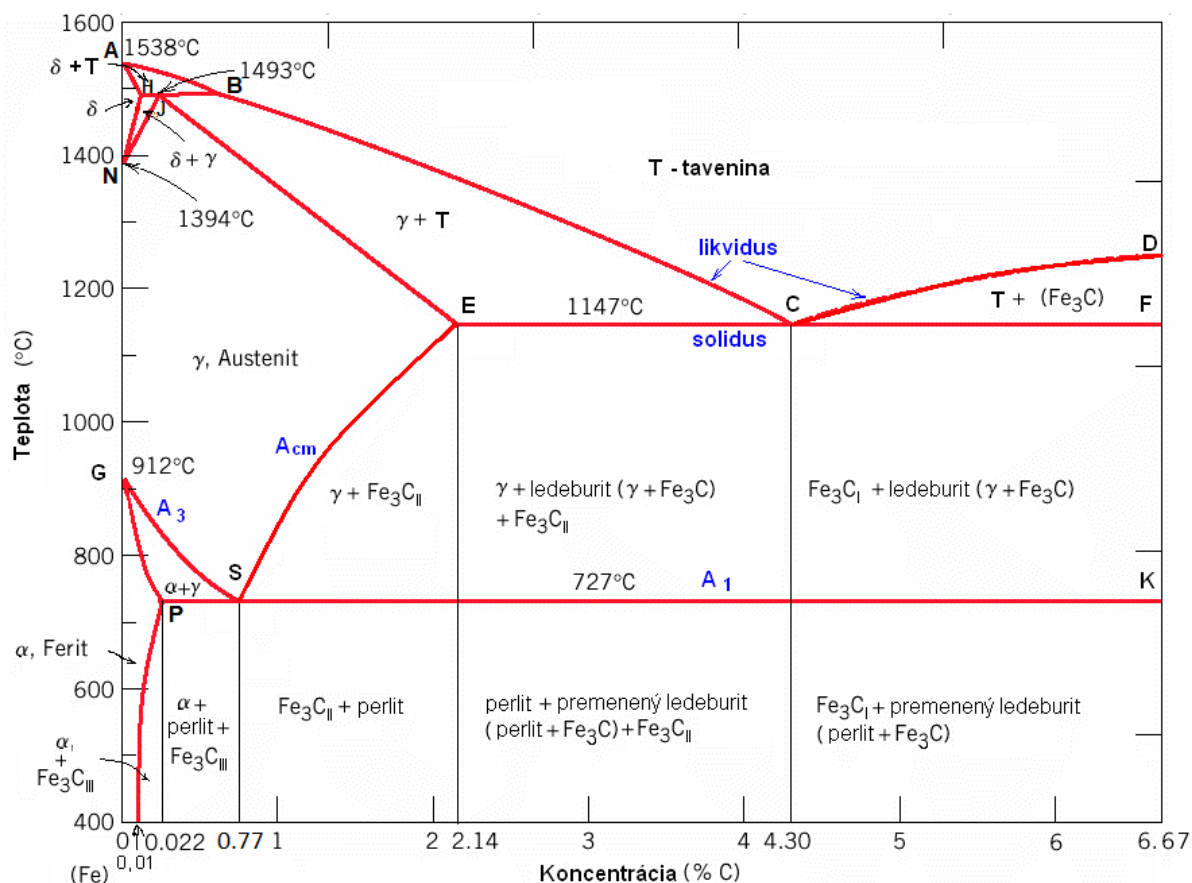
Obr.5.10 Binárne rovnovážne diagramy

## Téma č. 6: METASTABILNÝ ROVNOVÁŽNY DIAGRAM Fe – Fe<sub>3</sub>C

Zliatiny železa s uhlíkom sú najrozšírenejšími technickými zliatinami. Základom štúdia týchto zliatin je diagram Fe – C v stabilnej alebo v metastabilnej forme. Metastabilný diagram Fe – Fe<sub>3</sub>C (v rozsahu 0 – 6,67 %C) sa používa pri sledovaní kryštalizácie a prekryštalizácie uhlíkových ocelí a ledeburitických (bielych) liatin.

### Popis základných fáz a reakcií

Sústava Fe – Fe<sub>3</sub>C, obr. 6.1, je typom binárnej sústavy s úplnou nerozpustnosťou jednej a obmedzenou rozpustnosťou druhej zložky. Môžeme ho charakterizovať ako diagram dvoch zložiek dokonale rozpustných v tekutom stave a obmedzene jednostranne (C sa rozpúšťa v mriežke Fe) rozpustných v tuhom stave, pričom jedna zložka (Fe) je polymorfná a dochádza k jej prekryštalizácii. Podľa tejto sústavy kryštalizujú ocele (zliatiny Fe a C do obsahu 2,14 %C) a ledeburitické liatiny (od 2,14 do 6,67 %C).



Obr.6.1 Metastabilný rovnovážny diagram Fe – Fe<sub>3</sub>C

Základné pojmy k rovnovážnym binárnym diagramom:

**likvidus** – čiara, vyznačujúca začiatok primárnej kryštalizácie zliatin sústavy,

**solidus** – čiara, vyznačujúca koniec procesu primárnej kryštalizácie zliatin.

V rovnovážnom diagrame Fe – Fe<sub>3</sub>C sa vyskytujú tieto fázy:

**Tavenina T** – neobmedzený tekutý roztok atómov Fe a C.

**Ferit -  $\alpha$**  - intersticiálny tuhý roztok uhlíka v Fe <sub>$\alpha$</sub> . Atómy C sú umiestnené v strede stien základnej bunky mriežky železa Fe <sub>$\alpha$</sub>  s kubickou objemovo centrovanou mriežkou s maximálnou rozpustnosťou 0,02 %C pri 727°C.

**$\delta$  ferit -  $\delta$**  - tuhý roztok uhlíka v železe  $\delta$  s kubickou objemovo centrovanou mriežkou.

**Austenit -  $\gamma$**  - intersticiálny tuhý roztok uhlíka v Fe <sub>$\gamma$</sub>  s kubickou plošne centrovanou mriežkou, s maximálnou rozpustnosťou 2,14 %C pri 1147°C.

**Cementit - Fe<sub>3</sub>C** – karbid železa. Je to chemická zlúčenina, vznikajúca pri obsahu 6,67 %C. Má zložitú kryštalografickú mriežku – rhombickú.

Podľa podmienok vzniku rozoznávame päť druhov cementitu a označujú sa ako C<sub>I</sub> - C<sub>V</sub>:

1. *primárny* Fe<sub>3</sub>C<sub>I</sub> – kryštalizuje priamo z taveniny v oblasti CDF a tvorí hrubé ihlicovité až doskovité útvary,
2. *sekundárny* Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub> – vylučuje sa z austenitu u nadeutektoidných ocelí a liatin v dôsledku znižovania sa rozpustnosti C v austenite s klesajúcou teplotou,
3. *terciálny* Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub> – vzniká v dôsledku znižovania sa rozpustnosti C vo ferite s klesajúcou teplotou,
4. *eutektický* Fe<sub>3</sub>C<sub>IV</sub> – súčasť eutektika – ledeburitu,
5. *eutektoidný* Fe<sub>3</sub>C<sub>V</sub> – súčasť eutektoidu – perlitu.

Ďalšie štruktúrne zložky sú:

**Ledeburit L** – je to eutektikum, ktoré sa skladá z dvoch fáz, austenitu a cementitu. Vzniká z taveniny o chemickom zložení 4,3 %C a teplote 1147°C.

**Perlit P** – je to mechanická zmes striedavo vylúčeného feritu a cementitu. Vzniká z austenitu, ktorý nadobudol chemické zloženie bodu S (0,78 %C) pri teplote 727°C, nazýva sa *eutektoid*.

**Ledeburit pretvorený L<sub>p</sub>** – eutektikum – mechanická zmes pozostávajúca z perlitu a cementitu.

V metastabilnom systéme Fe – Fe<sub>3</sub>C rozlišujeme tri základné reakcie:

1. **Peritektická reakcia** – pri teplote 1499°C, dochádza k reakcii medzi primárne vylúčenými kryštálkami  $\delta$  a taveninou T za vzniku kryštálov podľa rovnice:



Množstvo peritekticky vzniknutých kryštálov  $\gamma$  závisí od obsahu uhlíka.

2. **Eutektoidná reakcia** – pri teplote 727°C a zložení 0,78 %C – bod S – sa austenit rozpadá na charakteristickú lamelárnu zmes striedavo sa vylučujúceho eutektoidného cementitu Fe<sub>3</sub>C<sub>V</sub> a feritu podľa rovnice



Túto eutektoidnú lamelárnu zmes nazývame *perlit* (P =  $\alpha$  + Fe<sub>3</sub>C<sub>V</sub>). Je to zmes lamiel feritu a eutektoidného cementitu. Rôzna hustota v jednotlivých zrnách je daná rôznym sklonom lamiel k rovine výbrusu. Za určitých podmienok (pri tepelnom spracovaní – žíhaní na mätko)

sa doštičky cementitu zbaľujú a dostávame tak štruktúru globulárneho perlitu – zmes zrn cementitu vo feritickej hmote.

**3. Eutektická reakcia** – pri teplote 1147°C a koncentrácii 4,3 %C – bod C – dochádza k striedavej kryštalizácii jemnej zmesi – austenitu  $\gamma$  a eutektického cementitu  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{IV}}$  z taveniny podľa rovnice



Vznikajúca eutektická zmes austenitu a eutektického cementitu sa nazýva *ledeburit*. Eutektickou reakciou končí kryštalizácia zliatin s obsahom 2,14 až 6,67 %C. Pri eutektoidnej teplote 727°C sa austenit rozpadá na perlit a výsledná štruktúra je tvorená jemným perlitom a eutektickým cementitom a nazýva sa *premený ledeburit*.

Z hľadiska technického využitia sa rovnovážny diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C rozdeľuje na dve základné oblasti:

- a) ocele - zliatiny Fe a ďalších sprievodných prvkov s obsahom uhlíka do 2,14 %,
- b) liatiny - zliatiny Fe a ďalších sprievodných prvkov s obsahom uhlíka do 2,14 - 6,67 %.

Ocele podľa obsahu C môžeme rozdeliť na:

- a) *feritické* - do 0,02 %C,
- b) *podeutektoidné* - 0,02 - 0,78 %C,
- c) *eutektoidné* - pri 0,78 %C,
- d) *nadeutektoidné* - od 0,78 - 2,14 %C.

Biele liatiny sa rozdeľujú:

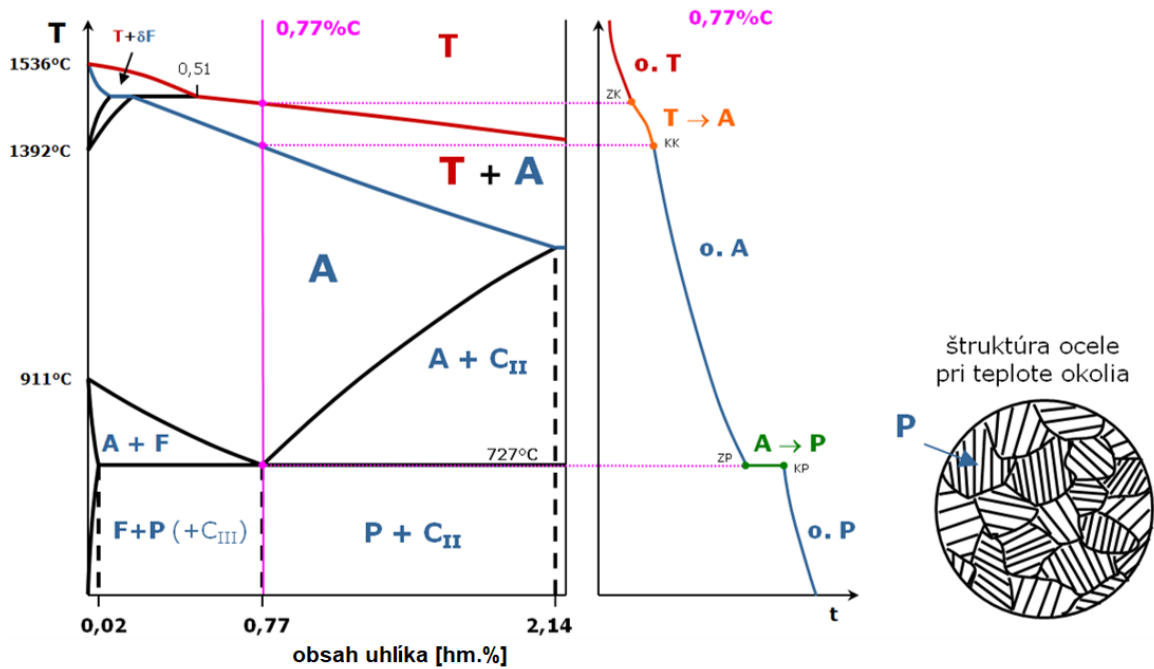
- a) *podutektické* - od 2,14 - 4,3 %C
- b) *eutektické* - pri obsahu 1,3 %C
- c) *nadeutektické* - od 4,3- 6,67 %C.

Princíp zostrojenia kriviek ochladzovania z binárneho metastabilného diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C je na obr.6.2. Vychádza z termickej analýzy zliatin Fe o danej koncentrácii pri voľnom ochladzovaní, kedy dochádza k fázovým premenám. Krivky ochladzovania ocelí (Z1 až Z4) a bielych liatin (Z5 - Z7) z metastabilného diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C sú uvedené na obr. 6.3 - 6.4.

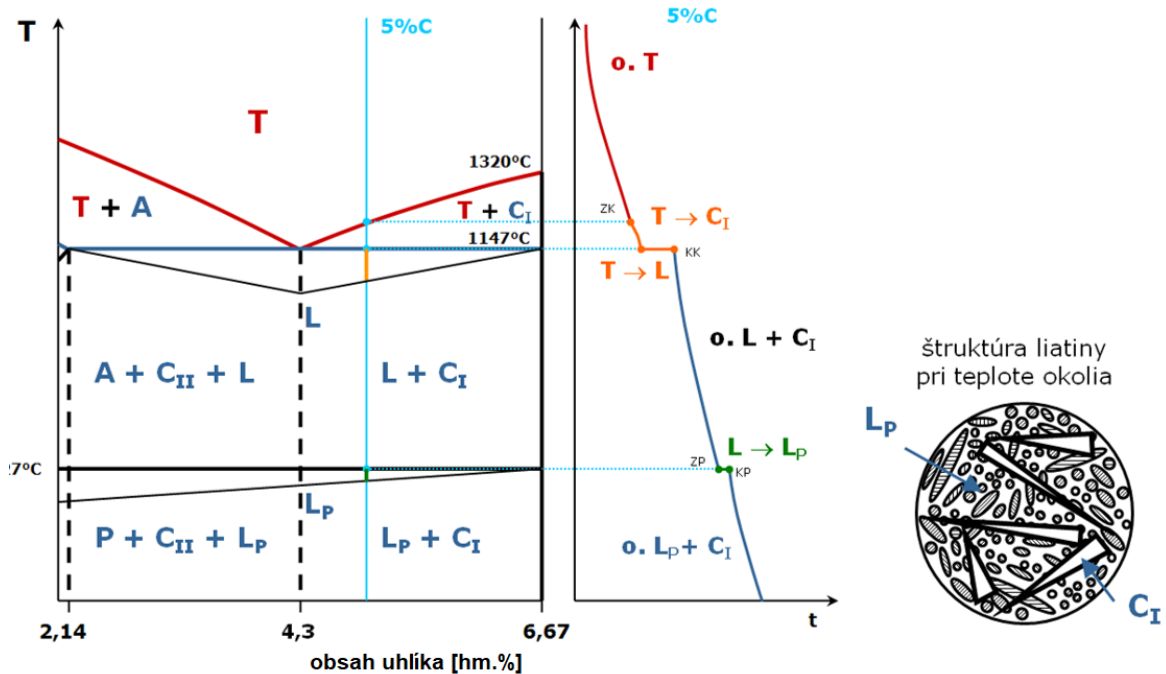
### Zliatina Z<sub>1</sub>

Pri teplotách nad bodom 1 je prítomná homogénna tavenina. Pod bodom 1 kryštalizuje z taveniny  $\delta$ -ferit, zloženie  $\delta$ -feritu sa mení podľa čiary solidus a zloženie taveniny podľa čiary likvidus. V bode 2 kryštalizácia končí, v intervale teplôt 2-3 prebieha len voľné ochladzovanie  $\delta$ -feritu. V bode 3 začína prekryštalizácia  $\delta$ -feritu na austenit, tento proces pokračuje v intervale teplôt do bodu 4. Vzniká homogénny nízkouhlíkový austenit. Pri teplotách medzi bodmi 4-5 prebieha len voľné ochladzovanie austenitu. Pod bodom 5 dochádza k prekryštalizácii - fázovej premene austenitu ( $\gamma$ ) na ferit ( $\alpha$ ). Pri ďalšom poklese teplôt v intervale 6-7 sa voľne ochladzuje homogénny ferit. V bode 7 sa stáva ferit nasýtený uhlíkom a pri nižších teplotách (pod bodom 7) by bol presýtený a pre dosiahnutie rovnovážneho stavu sa z neho vylučuje uhlík vo forme  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ . Výsledná štruktúra tejto zliatiny je tvorená feritom a

$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ . Nakoľko vylučovanie  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$  sa deje pri nízkych teplotách a vo veľmi malej miere, často nedôjde k jeho vylúčeniu a štruktúru tvorí iba ferit ( $\alpha$ ).

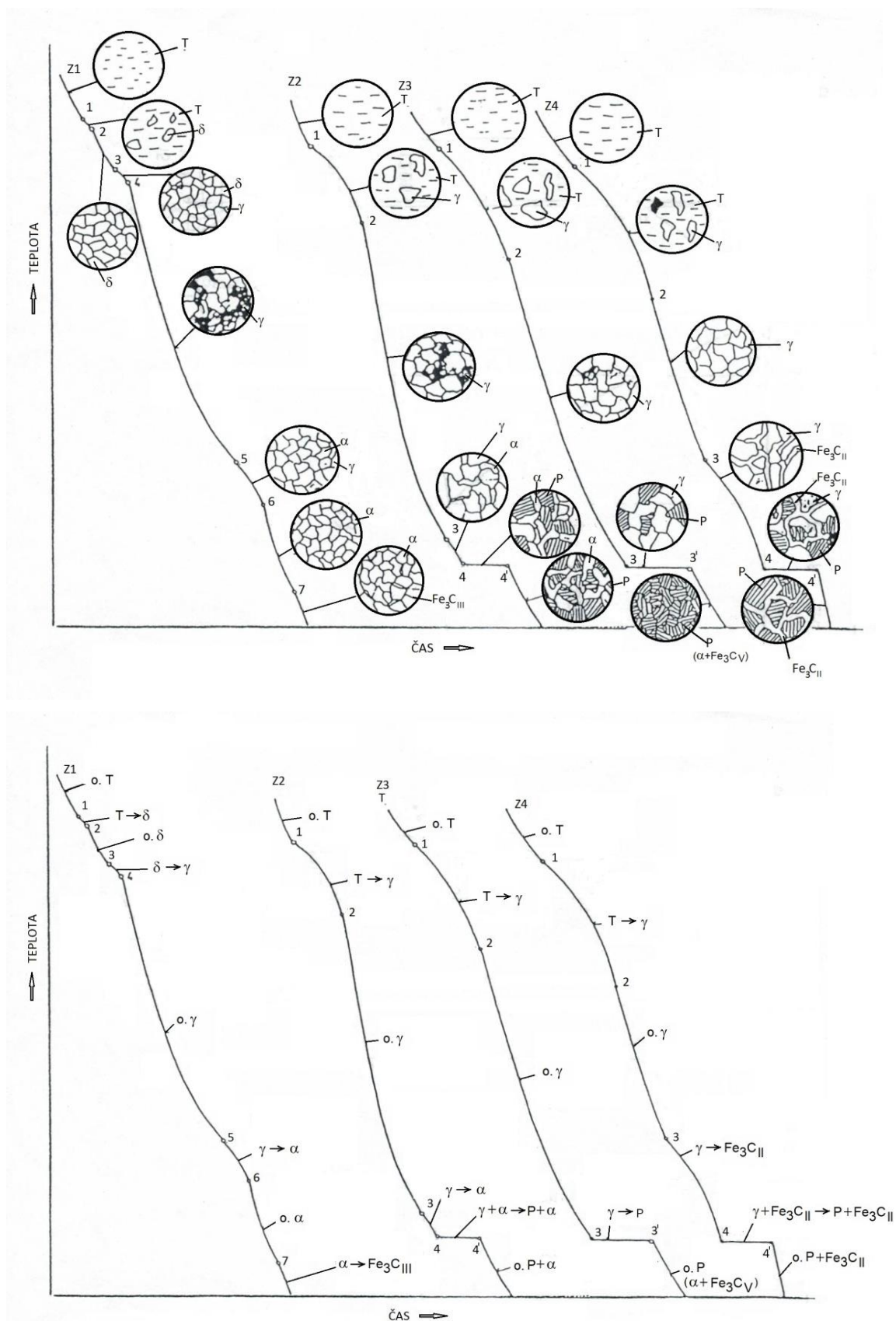


a)

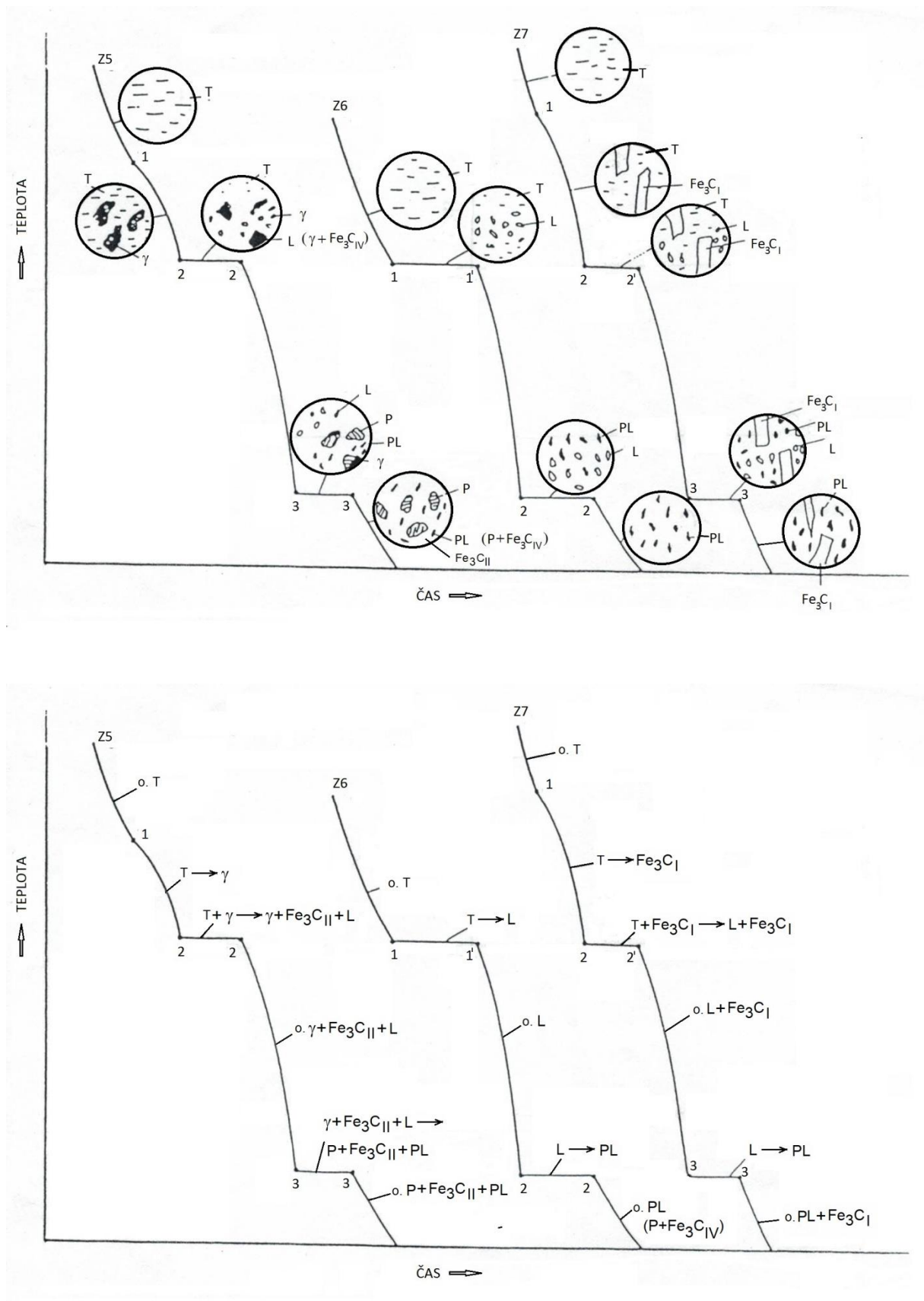


b)

Obr.6.2 Princíp zostrojenia kriviek ochladzovania z binárneho metastabilného diagramu Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ ; a) oblasť ocelí, b) oblasť bielych liatin



Obr.6.3 Krivky ochladzovania ocelí Z1 až Z4 z metastabilného diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C (z obr.6.1)



Obr.6.4 Krivky ochladzovania bielych liatin Z5 - Z7 z metastabil. diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C (z obr.6.1)

**Zliatina Z<sub>2</sub>**

Pri teplotách nad likvidom (nad bodom 1) existuje len tavenina. Kryštalizácia austenitu začína v bode 1 a končí v bode 2. Od bodu 2 do bodu 3 prebieha ochladzovanie austenitu, ktoré je spojené so zmenou parametra mriežky. Tesne pod bodom 3 začína prekryštalizácia austenitu na ferit, pritom sa v priebehu vylučovania feritu zloženie austenitu mení podľa čiary GS a v bode 4 nadobúda austenit eutektoidné zloženie. Je chemicky aj energeticky pripravený k rovnovážnemu eutektoidnému rozpadu na perlit, ktorý prebieha izotermicky na zádržnej čiare 4–4'. Výsledná štruktúra tejto zliatiny je tvorená feritom a perlitom, biele zrná sú feritické a tmavé sú zrná eutektoidu - perlitu (ferit a eutektoidný cementit). Množstvo perlitu bude závisieť od chemického zloženia – od obsahu uhlíka. Pri nižších percentách C bude menej perlitu a ferit bude polyedrický, so stúpajúcim % C pribúda perlit a pri vysokom obsahu perlitu je ferit vylúčený vo forme sieťovej štruktúry. Mikroštruktúry feriticko-perlitických ocelí zoradené podľa vzrastajúceho percenta uhlíka sú na obr.6.5 a-d.

Pri kryštalizácii feriticko-perlitických zliatin môže dôjsť k určitým zvláštnostiam:

1. Dendritická likvácia silne ovplyvňuje rozloženie štruktúrnych zložiek feritu a perlitu. Pri pomalom ochladzovaní takéhoto materiálu sa po osiach dendritu vylučuje ferit a perlit sa sústreďuje do medzidendritických priestorov. Toto usporiadanie sa nachádza u liatej ocele. V prípade, že sú dendrity rozvalcované, vzniká riadkovitá feriticko-perlitická štruktúra tvorená striedavo riadkami feritu a perlitu.
2. Hrubozrnný austenit obsahujúci 0,15–0,4 % C, ktorý vznikol prehriatím pri vysokých dovalcovacích teplotách, prejavuje pri určitých rýchlostiach tendenciu k štruktúrnemu zoskupeniu, ktoré nazývame Widmanstättenova štruktúra. Ferit sa vylučuje v doštičkovitých útvaroch, tieto vyrastajú buď zo sieťovej štruktúry po hraniciach zŕn alebo zo zárodokov vo vnútri austenitických zŕn.

**Zliatina Z<sub>3</sub>**

Kryštalizácia tejto zliatiny začína v bode 1 formou austenitu, v bode 2 kryštalizácia končí. Nakoľko táto zliatina má eutektoidné zloženie, voľne sa ochladzuje až do teploty 727°C – bod 3, kedy dochádza k eutektoidnému rozpadu v celom rozsahu. V celom intervale 3-3' vzniká perlit. Mikroštruktúra perlitickej ocele je tvorená perlitom (doštičkami feritu a eutektoidného cementitu) obr.6.5 e).

**Zliatina Z<sub>4</sub>**

Pri teplotách likvida - bod 1, začína kryštalizácia austenitu. V intrevale 1-2 kryštalizácia austenitu pokračuje. V rozsahu teplôt zodpovedajúcich bodom 2-3 dochádza k voľnému ochladzovaniu austenitu, v bode 3 je austenit nasýtený uhlíkom. Pri nižších teplotách sa rozpustnosť C v Fe znižuje a preto dochádza v intervale 3-4 k vylučovaniu uhlíka vo forme sekundárneho cementitu  $Fe_3C_{II}$  na hraniciach austenitických zŕn. Zloženie austenitu sa pritom mení podľa čiary ES a v bode 4 dosahuje eutektoidné zloženie. Dochádza k jeho rozpadu na perlit pri stálej teplote 727°C. Pod teplotou 727°C bude teda štruktúra pozostávať z perlitu a sieťovej štruktúry sekundárneho cementitu. Pri nadeutektoidných oceliach s nízkym obsahom uhlíka vznikajú tenké a nesúvislé sieťové štruktúry. Pri vyššom obsahu uhlíka je hrubšie súvislé sieťovanie sekundárneho cementitu. Na obr.6.5 f) je štruktúra nadeutektoidnej ocele s

perlitom a sekundárnym cementitom v tvare ihlíc siahajúcich do perlitických zŕn. Je to náznak Widmanstättenového vylúčenia. Ihlice  $\text{Fe}_3\text{C}_{II}$  na rozdiel od feritu (pri feriticko- perlitických oceliach) sú jemnejšie a užšie.

### Zliatina Z5

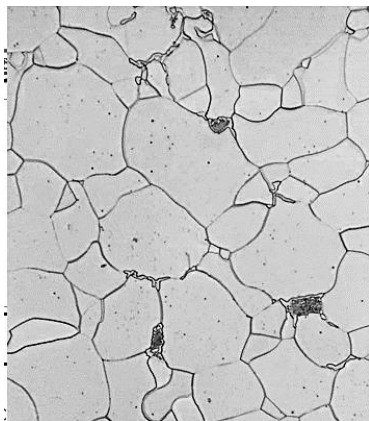
Kryštalizácia tejto zliatiny - podeutektickej bielej liatiny začína v bode 1 kryštalizáciou austenitu. Zloženie austenitu sa v priebehu kryštalizácie mení podľa čiary EC a zloženie taveniny podľa likvidusu BC. V bode 2 má tavenina eutektické zloženie a ďalej začína kryštalizácia eutektika vo forme ledeburitu - jemnej zmesi austenitu a eutektického cementitu v intervale 2-2'. V tepelnom intervale 2'-3 sa vylučuje sekundárny cementit ako z voľného austenitu, tak aj z ledeburitického austenitu. Pri eutektoidnej teplote 3-3' sa rozpadá austenit na perlit aj v ledeburite a ledeburit sa mení na premenený ledeburit tvorený perlitom a eutektickým cementitom. Mikroštruktúra podeutektickej bielej liatiny je na obr.6.5 g). Viditeľné sú dendriticky usporiadané zrná perlitu a medzi nimi jemná štruktúra eutektika - premeneného ledeburitu. Je dobre vykreslená štruktúra premeneného ledeburitu, ktorá pozostáva z ihlicovitých útvarov eutektického cementitu a jemných zŕn perlitu.

### Zliatina Z6

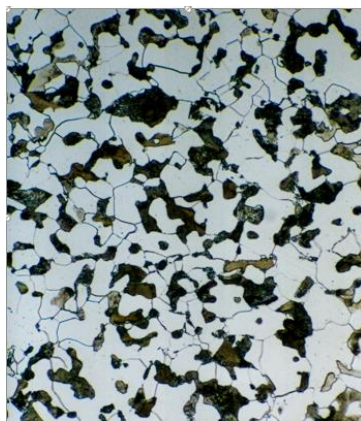
Je to zliatina eutektického zloženia. Kryštalizácia začína v intervale 1-1' vo forme ledeburitu - jemnej zmesi austenitu a eutektického cementitu. Z austenitu pozdĺž čiary JES (v intervale 1'- 2) sa vylučuje sekundárny cementit, ktorý sa však spája s eutektickým a v štruktúre ho nepozorujeme ako samostatnú fázu. V bode 2-2' sa austenit mení na perlit a vzniká premenený ledeburit. Mikroštruktúra eutektickej bielej liatiny je na obr. 6.5 h) s jemnými perlitickými útvarmi v cementitickom základe.

### Zliatina Z7

Tuhnutie nadeutektickej bielej liatiny začína v bode 1 vylučovaním primárneho cementitu. Primárny cementit kryštalizujúci priamo z taveniny v intervale 1-2 má formu veľkých doštičkovitých útvarov. Zloženie taveniny v tomto intervale sa pohybuje po čiare DC a v bode 2 tavenina nadobúda eutektické zloženie, takže v intervale 2-2' prebieha eutektická kryštalizácia, vzniká ledeburit. V tepelnom intervale 2'-3 sa opäť vylučuje sekundárny cementit v eutektiku a hneď sa pripája k eutektickému cementitu. Štruktúra je tvorená primárnym cementitom a premeneným ledeburitom, ktoré chladnú pod bodom 3. Mikroštruktúra nadeutektickej bielej liatiny je na obr. 6.5 i).



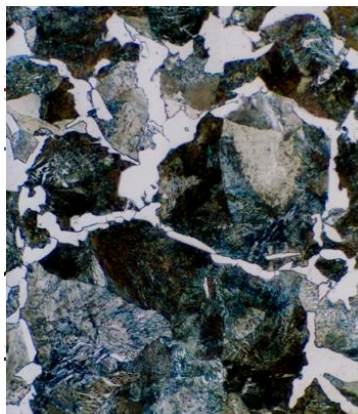
a) 0,06 % C



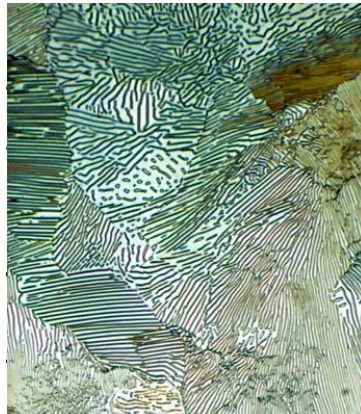
b) 0,16 % C



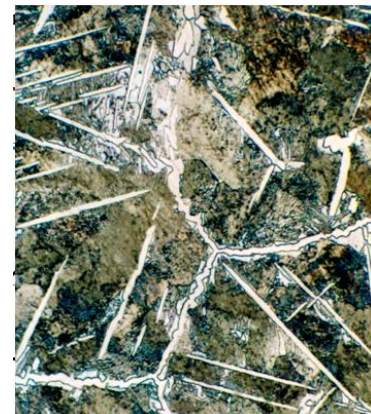
c) 0,4 % C



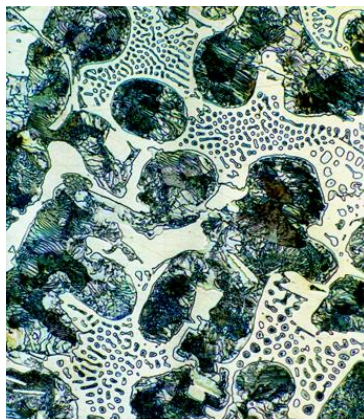
d) 0,6 % C



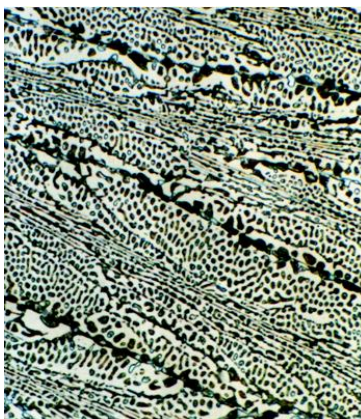
e) 0,77% C



f) 1,3 % C



g) 3 % C



h) 4,3% C



i) 5 % C

Obr.6.5 Mikroštruktúry ocelí a bielych liatin pri rôznej koncentrácii C, zv.150 x

### Úlohy:

1. Pomocou optickej mikroskopie analyzujte štruktúru zadanej vzorky uhlíkovej ocele resp. ledburitickej liatiny. Stanovte približný % obsah C danej zliatiny.
2. Pomenujte a opíšte danú štruktúru a vyznačte pozorovanú zliatinu do diagramu Fe – Fe<sub>3</sub>C. Pri popise štruktúry využite charakteristické štruktúry zliatin uvedené na obr.3.3.
3. Nakreslite krivku ochladzovania tejto zliatiny a popíšte proces kryštalizácie danej zliatiny.
4. Na základe štruktúrnej stavby stanovte očakávané vlastnosti sledovanej zliatiny.

## Téma č. 7: MECHANICKÉ SKÚŠKY STATICKÉ - SKÚŠKA ŤAHOM

Základné informácie o vlastnostiach materiálov poskytujú mechanické skúšky. Skúšobné metódy sú založené na pôsobení síl na skúšaný materiál a na kvantitatívnom resp. kvalitatívnom vyjadrení výsledku tohto pôsobenia, čiže na určení mechanických (materiálových) charakteristík materiálov. Výsledky skúšok sa vyjadrujú číselne, prípadne aj opisom a slúžia na vzájomné porovnanie materiálov, optimálnu voľbu, prípadne vývoj materiálov pre daný účel použitia v praxi.

Statická skúška ťahom pre svoju jednoduchosť a množstvo výsledkov, ktoré poskytuje patrí medzi najrozšírenejšie statické mechanické skúšky materiálov. Statickú skúšku ťahom predpisuje norma STN EN ISO 6892-1, resp. STN EN 10002.1 a zisťujú sa ňou základné mechanické vlastnosti materiálov, ktoré sú predpísané materiálovým listom daného materiálu.

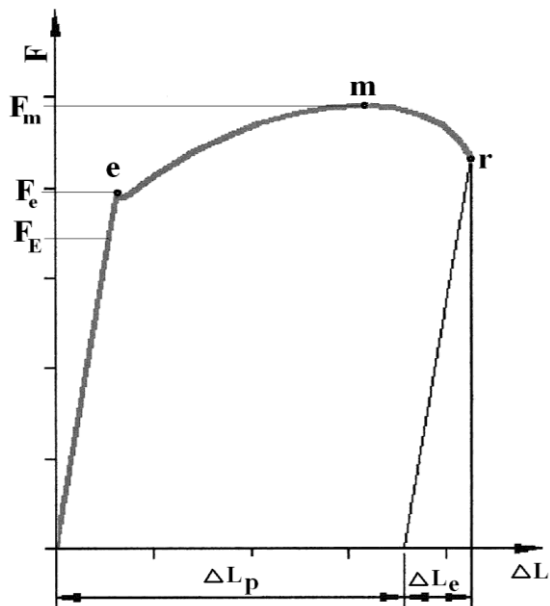
Vzhľadom na to, aká je ťahová skúška všestranná a univerzálna, všeobecne platí, že testovať môžeme skúšobné telesá vyrobené z akéhokoľvek materiálu pod podmienkou, že je možné vyrobiť vzorku tak, aby sa dala upnúť do čelustí ťhacieho stroja a lom nenastal v týchto miestach. Je zrejmé, že každý materiál bude vykazovať inú závislosť napätia na deformácii a taktiež iné hodnoty napäťových a deformačných charakteristík, v závislosti na vopred zvolených podmienkach zaťažovania. Výroba určitého typu skúšobného telesa s požadovaným spôsobom upnutia, vrátane jeho rozmerov a celkovej geometrie, je podriadená zavedeným normám pre jednotlivé materiály.

### Princíp skúšky

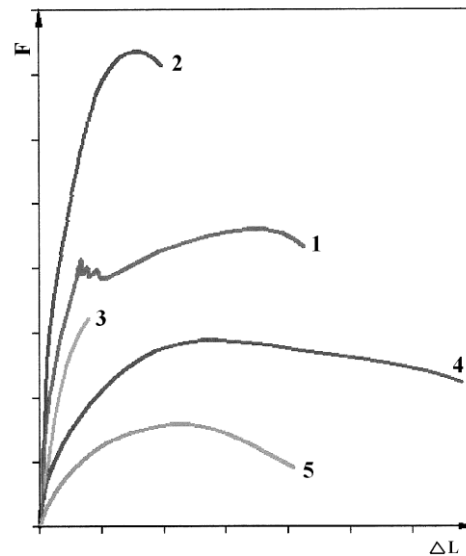
Princíp skúšky spočíva v statickom zaťažovaní skúšobnej tyče predpísaných tvarov a rozmerov. Vzorka je upnutá do čelustí skúšobného stroja tak, aby sa os vzorky zhodovala s osou pôsobiacej sily. Sila  $F$  postupne plynulo vzrastá až do pretrhnutia vzorky, pričom sa skúšobná tyč predlžuje. V prvej fáze sa tyč predlžuje pružne a predĺženie  $\Delta L$  je priamo úmerné sile  $F$ . Priama úmernosť platí až do bodu  $e$ , obr.7.1. V ďalšej fáze sa tyč predlžuje plasticky – nevratne. V bode  $m$  sa na tyči prejaví výrazné zúženie priemeru tyče a vytvorí sa zúžené miesto tzv. krčok. K pretrhnutiu tyče dôjde v bode  $r$ . Celkové predĺženie tyče pri pretrhnutí sa potom rovná súčtu elastického predĺženia  $\Delta L_e$  a plastického predĺženia  $\Delta L_p$ .

Počas skúšky sa zaznamenáva závislosť predĺženia skúšobnej tyče od pôsobiaceho zaťaženia, tzv. ťahový diagram, ktorý je registrovaný skúšobným strojom. Pracovný diagram skúšky ťahom znázorňuje priebeh odporu skúšaného materiálu proti jeho deformácii a porušeniu. Preto má každý materiál a jeho stav charakteristický tvar diagramu skúšky ťahom, obr.7.2.

Na obr. 7.3 je vyobrazená závislosť napätia na deformácii pre vybrané kovové materiály, pričom je vidieť, že horčík vo forme čistého kovu má značne nižšie pevnostné charakteristiky v porovnaní s oceľami alebo zliatinami neželezných kovov. To platí vo všeobecnosti aj pre iné čisté kovy. Z dôvodu dosiahnutia čo najlepších mechanických vlastností pre danú konštrukčnú aplikáciu sa zavádzajú, skúšajú a používajú rôzne zliatiny, kde sú tieto mechanické vlastnosti zaručené kombináciou dvoch alebo viacerých prvkov v určitom pomere. Taktiež sa kladie dôraz na optimalizáciu chemického zloženia pre dané použitie.

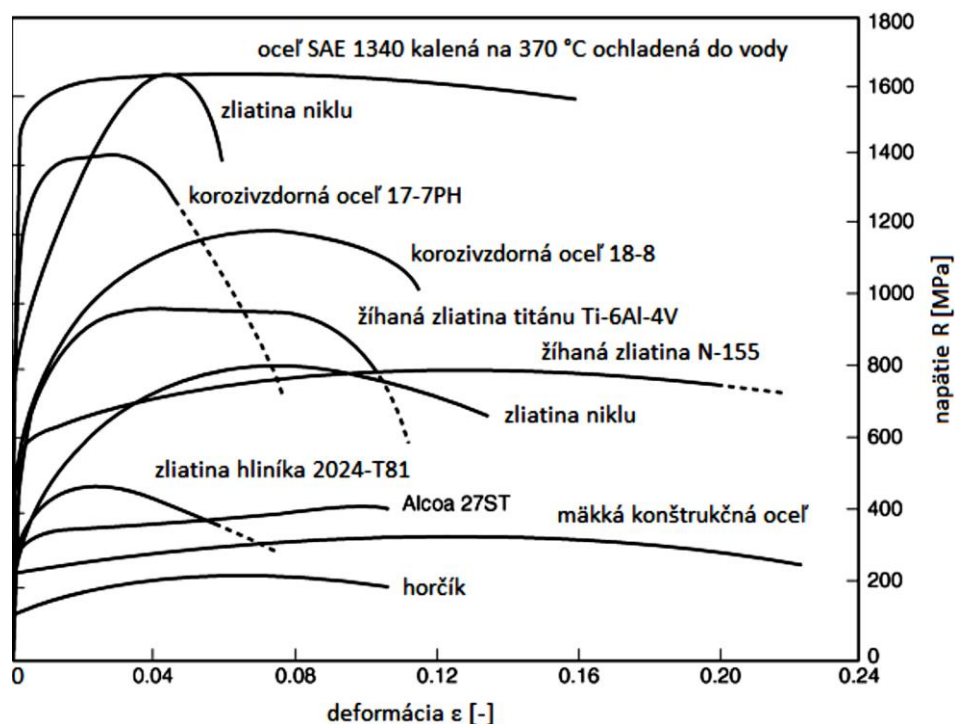


Obr.7.1 Ťahový diagram s výraznou medzou klzu



Obr.7.2 Základné typy ťahových diagramov  
1-mäkká oceľ, 2-tvrdá oceľ, 3-sivá liatina,  
4-tvárne materiály (Cu), 5-tvárne materiály

Je zrejmé, že skúšku ťahom môžeme vykonávať na rôznych druhoch materiálov, avšak výsledky sa budú značne líšiť. Získané napäťovo-deformačné závislosti sú závislé na podmienkach skúšky – teplote a deformačnej rýchlosti. Uvedené závislosti vytvárajú obraz o materiáli a jeho správaní pri zaťažovaní jednoosovým ťahom, pričom výrazne uľahčujú rozhodovanie pri použití daných materiálov v praxi (zistením ich napäťových a deformačných charakteristík).



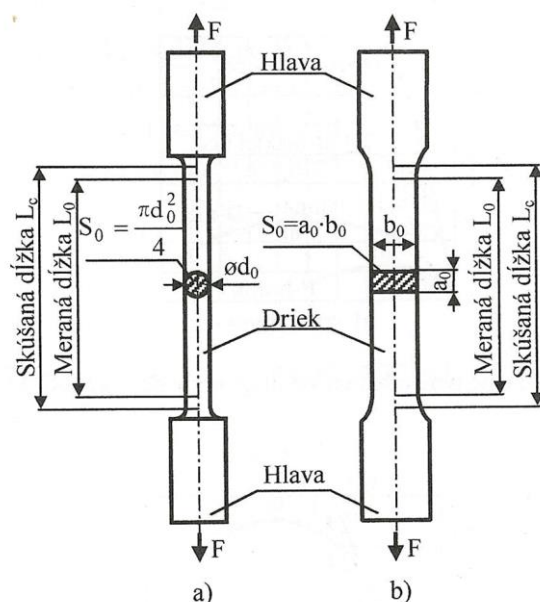
Obr. 7.3 Príklady vlastností rôznych kovových materiálov stanovených pomocou skúšky ťahom

### Skúšobné telesá

Skúšobné teleso pre skúšku ťahom môže mať tvar kruhových alebo plochých tyčí. Tyče sa upínajú v rozšírenej časti – hlave do čeľustí skúšobného stroja. Príklady používaných skúšobných tyčí sú uvedené na obr.7.4 a v tab. 7.1.

Tabuľka 7.1 Skúšobné tyče pre statickú skúšku ťahom

| Skúšobná tyč | Meraná dĺžka $L_0$   |                                               | Označenie ťažnosti |
|--------------|----------------------|-----------------------------------------------|--------------------|
|              | pre kruhový prierez  | pre štvorcový, obdĺžnikový, príp. iný prierez |                    |
| krátka       | $L_0 = 5 \cdot d_0$  | $L_0 = 5,65 \cdot (S_0)^{0,5}$                | $A_5$              |
| dlhá         | $L_0 = 10 \cdot d_0$ | $L_0 = 11,3 \cdot (S_0)^{0,5}$                | $A_{10}$           |



Obr.7.4 Príklady skúšobných tyčí pre statickú skúšku ťahom: a – skúšobná tyč kruhového prierezu, b – plochá skúšobná tyč obdĺžnikového prierezu

#### Pri skúške sa merajú a vyhodnocujú tieto veličiny:

#### Rozmer

V prípade tyčí s kruhovým prierezom:

$d_0$  - počiatočný priemer skúšobnej tyče

mm

$d_u$  - najmenší, konečný priemer skúšobnej tyče

mm

V prípade plochých tyčí:

$a_0$  - počiatočná hrúbka skúšobnej tyče

mm

$b_0$  - počiatočná šírka skúšobnej tyče

mm

$a_u$  - najmenšia, konečná hrúbka tyče po roztrhnutí

mm

$b_u$  - najmenšia, konečná šírka tyče po roztrhnutí

mm

$S_0$  - počiatočná plocha prierezu skúšobnej tyče

mm<sup>2</sup>

$S_u$  - najmenšia, konečná plocha prierezu skúšobnej tyče

mm<sup>2</sup>

$L_0$  - počiatočná, meraná dĺžka skúšobnej tyče

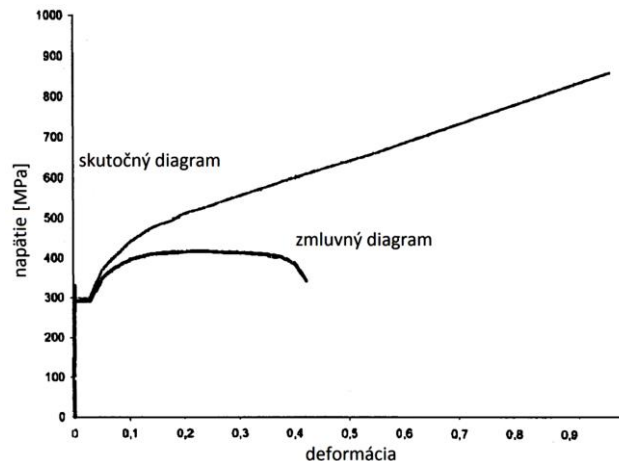
mm

$L_u$  - konečná dĺžka skúšobnej tyče po roztrhnutí

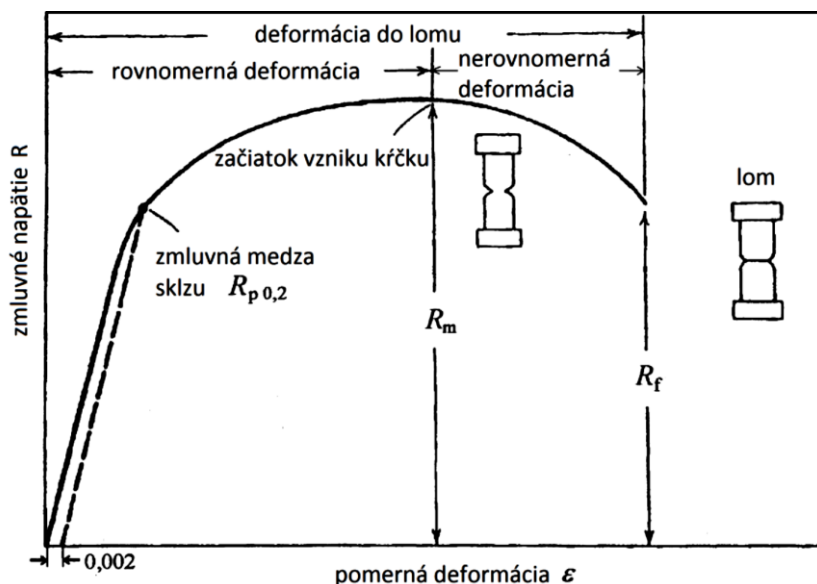
mm

**Vyhodnotenie skúšky**

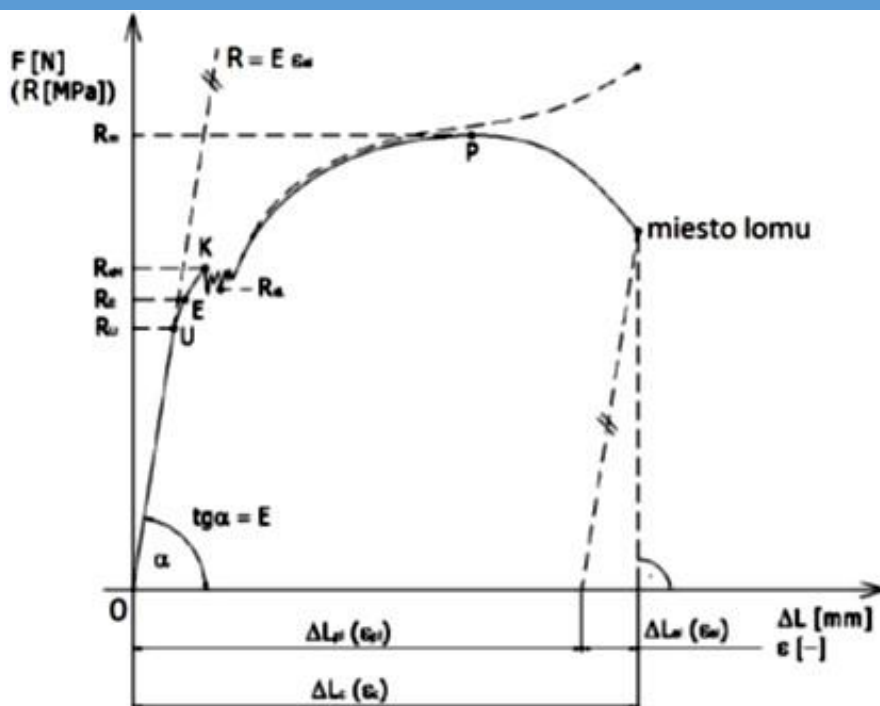
Zmluvný ťahový diagram je prostriedkom tzv. „inžinierskeho prístupu“. Slúži na odhad chovania materiálu pri jeho aplikáciách a na zisťovanie napäťových a deformačných charakteristík materiálov. Dôležité je, že je použiteľný iba pri malých deformáciách a malých zmenách tvaru skúšobnej vzorky. Diagram skutočné napätie – skutočná deformácia sa používa napríklad pri pevnostných výpočtoch súčiastok, pri tváriteľnosti plechov a v množstve iných analýz. Pre porovnanie týchto dvoch diagramov je uvedený obr. 7.5. Príklady zmluvných diagramov pre polykrystalický materiál z hľadiska etáp skúšky a charakteristík sú na obr. 7.6 a 7.7.



Obr. 7.5 Porovnanie zmluvného a skutočného ťahového diagramu



Obr. 7.6 Zmluvný diagram napätie-deformácia z hľadiska etáp skúšky



Obr. 7.7 Zmluvný diagram napätie-deformácia z hľadiska charakteristík

Prvú časť diagramu na obr. 7.7 – od bodu 0 do bodu U – tvorí priamka, ktorá predstavuje elasticnú deformáciu. Vratná elasticná deformácia je v prípade kovových materiálov určená množstvom deformácie, ktorá môže byť vyvolaná v jednotlivých kovových väzbách pred porušením. Táto hodnota sa pohybuje väčšinou pod hranicou 1%. Predĺženie skúšobnej tyče je merané a zaznamenávané snímačom umiestneným priamo na nej. V prípade, že predĺženie skúšobného telesa je odvodené z pohybu priečnika trhacieho stroja, zahŕňa sklon tejto časti ťahového diagramu okrem elastickej deformácie skúšobnej tyče aj elasticnú deformáciu častí skúšobného stroja – rám stroja, dynamometer a čeluste, ktorá býva rádovo väčšia ako elasticná deformácia vzorky. Z toho dôvodu sa nedá v tomto prípade modul  $E$  vyhodnotiť.

V úseku od bodu U do bodu P zostáva deformácia rovnomerná, avšak z dôvodu začiatku hromadenia plastickej deformácie sa stráca linearita a nastáva odklon od pôvodného priamkového trendu. Napätie sa stále zvyšuje s nárastom deformácie až do najvyššieho bodu diagramu, ktorý daná závislosť dosiahne. Dej prebiehajúci v tejto časti diagramu sa nazýva deformačné spevňovanie. V bode P po skončení rovnomerného zužovania mernej časti skúšobnej tyče, t.j. extenzometrom meraného úseku na skúšobnej vzorke, následne vzniká kĺčok a ďalšia deformácia je spojená s poklesom (relaxáciou) napätia. Po skončení tejto nerovnomernej plastickej deformácie, t.j. po vyčerpaní možných sklzových systémov dislokácií, nastáva porušenie (lom) skúšobnej tyče. Ťahová skúška sa považuje za úspešnú len v prípade, že lom nastane v mernej časti vzorky a nepretrhne sa napríklad v mieste upnutia.

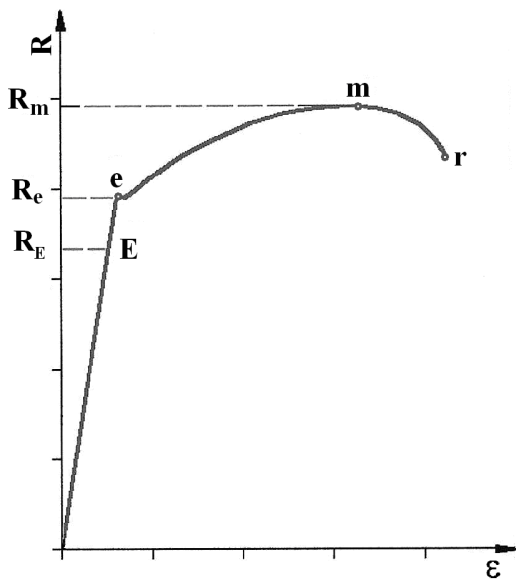
Z ťahového diagramu moderných trhacích strojov je možné priamo odčítať niektoré materiálové charakteristiky, ako je medza klzu  $R_e$ , medza pružnosti  $R_E$ , pevnosť v ťahu  $R_m$ , ťažnosť  $A$  a zúženie  $Z$ , obr. 7.8. Podkladom pre vyhodnotenie skúšky sú aj údaje silomera skúšobného stroja, rozmery a tvar skúšanej tyče pred a po skúške.

**$R_e$  medza klzu** – je napätie, pri ktorom sa materiál trvalo deformuje bez výrazného zväčšenia zaťaženia.

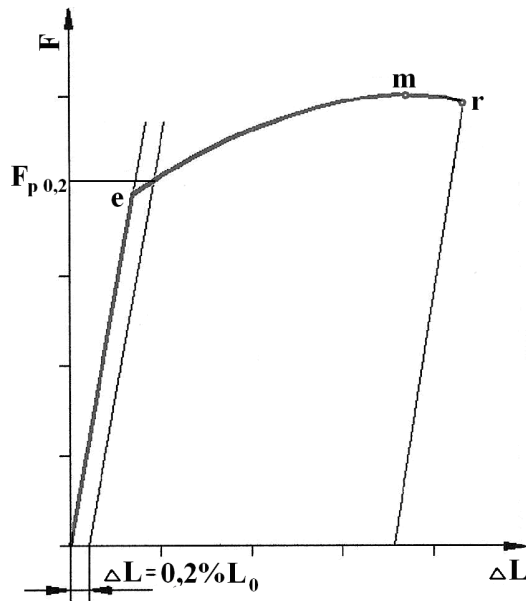
$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (7.1)$$

**$R_p$  dohovorená medza klzu** – stanovuje sa z ťahového diagramu pomocou priamky rovnobežnej s lineárnou časťou diagramu vo vzdialenosti, ktorá zodpovedá predpísanej hodnote plastickej deformácie napr. 0,2 % ( $R_{p0,2}$ ). Priesečník, v ktorom priamka pretína krivku, udáva zaťaženie zodpovedajúce požadovanej dohovorenej medzi klzu. Dohovorená medza klzu sa vypočíta ako pomer tohto zaťaženia k ploche začiatočného priečneho prierezu skúšobnej tyče  $S_0$ , obr.7.9.

$$R_p = \frac{F_p}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (7.2)$$



Obr.7.8 Ťahový diagram s popisom


Obr.7.9 Grafická metóda zistenia sily  $F_{p0,2}$  dohovorenej medzi klzu v ťahu

**$R_E$  medza pružnosti** – po medzu pružnosti sa materiál deformuje vratne (pružne), teda nenastáva žiadna plastická deformácia. Po odľahčení tyč nadobudne pôvodné rozmery.

$$R_E = \frac{F_E}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (7.3)$$

**$R_m$  pevnosť v ťahu** – je zmluvné napätie, zodpovedajúce podielu najväčšieho zaťaženia  $F_m$  a počiatočného prierezu  $S_0$ .

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (7.4)$$

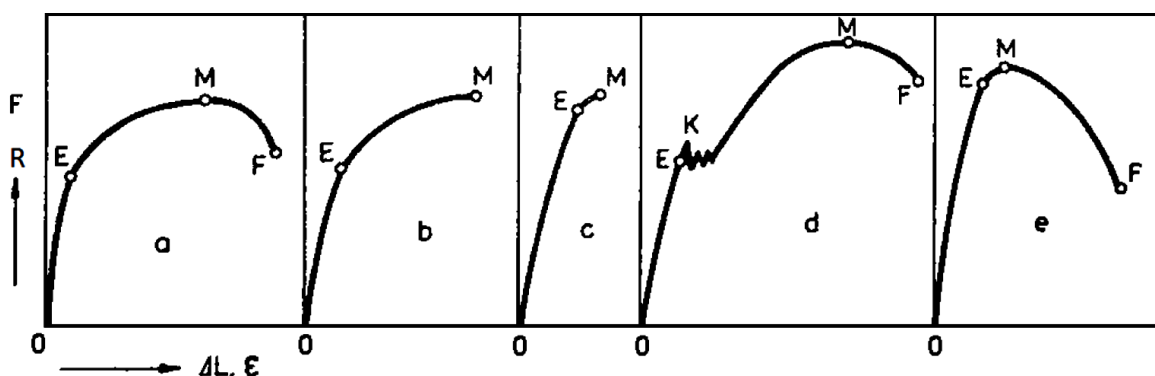
**$A$  ťažnosť** – je to trvalé predĺženie meranej časti skúšobnej tyče, dosiahnuté po roztrhnutí, vyjadrené v percentách.

$$A = \frac{L_U - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.5)$$

**Z zúženie** – je to najväčšia zmena prierečného prierezu po roztrhnutí skúšobnej tyče, vyjadrená v percentách

$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.6)$$

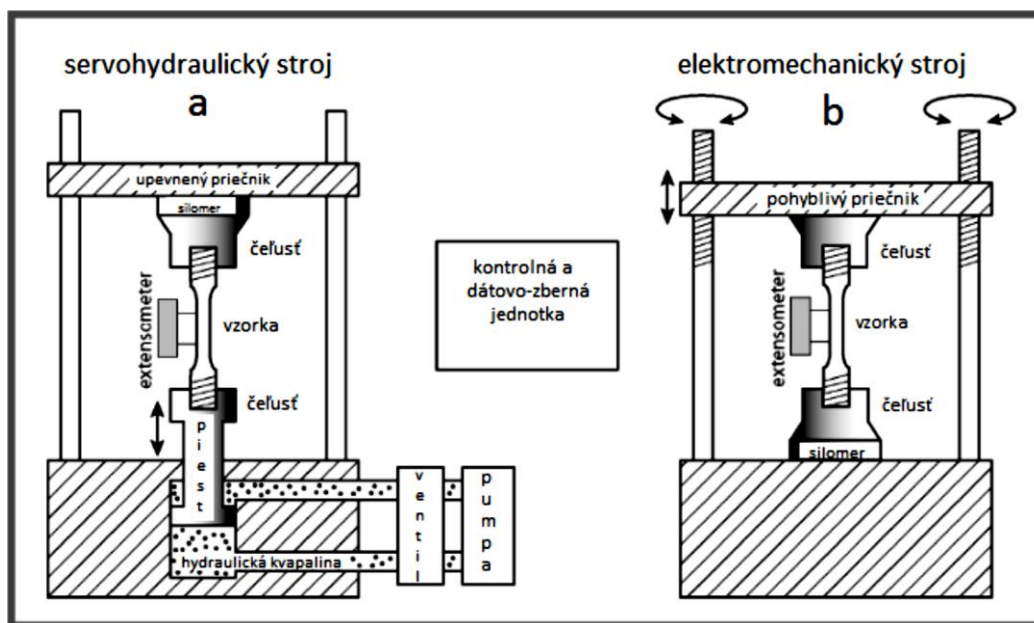
Na obr. 7.10 je uvedený prehľad možných základných tvarov týchto diagramov. Prvý typ diagramu, obr. 7.10 a), je najbežnejší – jedná sa o klasický pomer medzi jednotlivými oblasťami diagramu bez výraznej medze klzu (medza klzu bude približená neskôr v tejto práci). Ďalší tvar, obr. 7.10 b), neobsahuje tvorbu krčka a porušenie nastáva pri najväčšej zaťažovacej sile na základe značného deformačného spevnenia. V prípade obr. 7.10 c) vzniká veľmi malá plastická deformácia pred samotným lomom (krehké chovanie materiálu). Tvar diagramu na obr. 7.10 d) je charakteristický výraznou medzou klzu. Posledný typ diagramu, obr. 7.10 e), ilustruje obmedzené deformačné spevňovanie v oblasti plastickej stability.



Obr. 7.10 Základné typy ťahových diagramov

### Skúšobné stroje

Pre skúšku ťahom sa používajú trhacie stroje. Podľa spôsobu zaťažovania môžu byť mechanické a hydraulické, obr. 7.11. Mechanické trhacie stroje majú uplatnenie pri menších zaťaženiach (do 100 kN), pre vyššie zaťaženia sa používajú hydraulické stroje. Príklad hydraulického trhacieho stroja je na obr. 7.12.



Obr. 7.11 Schéma trhacieho stroja a) hydraulického b) mechanického



Obr. 7.12 Hydraulický trhací stroj TIRA-test 2300

### Úlohy:

Vykonajte skúšku ťahom daného materiálu:

1. Zmerajte rozmery skúšobnej tyče pred statickou skúškou v ťahu.
2. Určite meranú dĺžku  $L_0$  a vyznačte ju na pracovnej časti tyče.
3. Po skúške ťahom vyhodnoťte ťahový diagram a vypočítajte základné mechanické vlastnosti ( $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A$  a  $Z$ ). Namerané a vypočítané hodnoty zapíšte do tabuľky 7.2.

Tab. 7.2

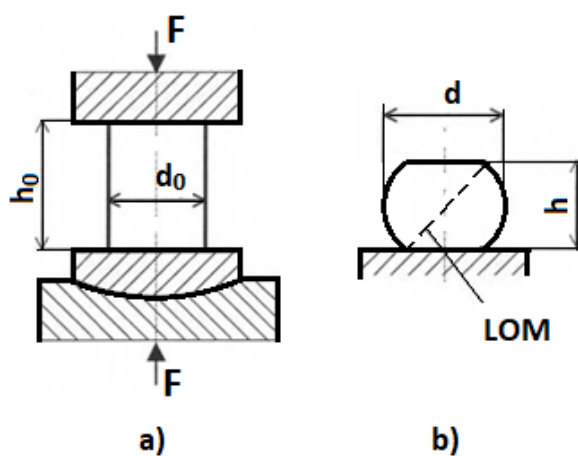
| číslo<br>skúš.<br>tyče | Rozmery skúšobnej tyče                              |                    |                |                                                     |                    |                | F <sub>e</sub><br>(F <sub>p0,2</sub> ) | F <sub>m</sub> | R <sub>e</sub><br>(R <sub>p0,2</sub> ) | R <sub>m</sub> | A | Z |
|------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|----------------|-----------------------------------------------------|--------------------|----------------|----------------------------------------|----------------|----------------------------------------|----------------|---|---|
|                        | pred skúškou                                        |                    |                | po skúške                                           |                    |                |                                        |                |                                        |                |   |   |
|                        | d <sub>0</sub><br>(a <sub>0</sub> .b <sub>0</sub> ) | S <sub>0</sub>     | L <sub>0</sub> | d <sub>u</sub><br>(a <sub>u</sub> .b <sub>u</sub> ) | S <sub>u</sub>     | L <sub>u</sub> |                                        |                |                                        |                |   |   |
|                        | [mm]                                                | [mm <sup>2</sup> ] | [mm]           | [mm]                                                | [mm <sup>2</sup> ] | [mm]           |                                        |                |                                        |                |   |   |
|                        |                                                     |                    |                |                                                     |                    |                |                                        |                |                                        |                |   |   |
|                        |                                                     |                    |                |                                                     |                    |                |                                        |                |                                        |                |   |   |
|                        |                                                     |                    |                |                                                     |                    |                |                                        |                |                                        |                |   |   |

## Téma č. 8: MECHANICKÉ SKÚŠKY STATICKÉ - SKÚŠKA V TLAKU, OHYBE, KRÚTENÍ A V STRIHU

V technickej praxi sú strojárske súčiastky a tiež konštrukcie zaťažované ťahom, tlakom, ohybom, krútením, a strihom resp. Kombináciou týchto zaťažení. Statická skúška ťahom je prezentovaná v predchádzajúcej kapitole, v téme č. 7. Vplyv týchto typov namáhania na súčiastky je možné hodnotiť pomocou normalizovaných laboratórnych skúšok.

### 1. Statická skúška v tlaku

Touto statickou skúškou sa zisťujú základné mechanické vlastnosti materiálu pri tlakovom namáhaní. U húževnatých materiáloch dochádza k trvalej plastickej deformácii nie k porušeniu skúmaných materiálov, preto u nich nie je možné zistiť pevnosť v tlaku. Skúška tlaku sa realizuje prevažne pri hodnotení krehkých materiálov najmä v stavebníctve pri hodnotení betónu, tehál a keramiky. V strojárstve sú to najmä liatiny a výrobky spekanej práškovej metalurgie, kde pôsobením tlaku dochádza ku krehkému porušeniu skúmaných materiálov. Pri skúške sivej liatiny sa používajú valčeky o priemere  $d_0 = 10$  až  $30$  mm a výške  $h_0 = (0,9 - 3) d_0$ . Statická skúška v tlaku sa realizuje na mechanických resp. Hydraulických trhacích strojoch pri použití tlačných čeľustí a ťažníkom (Obr. 8.1). Jedna z čeľustí má mať guľovité uloženie pre zaistenie centrického jednoosého zaťaženia.



Obr. 8.1 Statická skúška v tlaku

a) skúšobná vzorka pred skúškou, b) skúšobná vzorka po skúške

Skúška tlakom končí rozdrvením skúšobnej vzorky u krehkých materiálov, resp. po deformácii vzorky na súdkovitý tvar lomom vplyvom šmyku pod  $45^\circ$  uhlom. U tvárných materiálov sa nezisťujú medza pevnosti v tlaku ale napätie, ktoré vyvolá plastickej deformácii (napr. 2 %). Podobne ako pri skúške v ťahu je konštruovaný tlakový diagram závislosti sila  $F$  na dĺžke vzorky  $\Delta L$ . Vyhodnotenie skúšky spočíva vo vypočítaní medze pevnosti v tlaku  $R_{md}$  podľa vzťahu (8.1),

$$R_{md} = \frac{F_{md}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (8.1)$$

kde:  $F_{md}$  je sila, potrebná na porušenie vzorky,  $S_0$  je pôvodný prierez vzorky.

Z deformácie vzorky sa určí pomerné stlačenie:

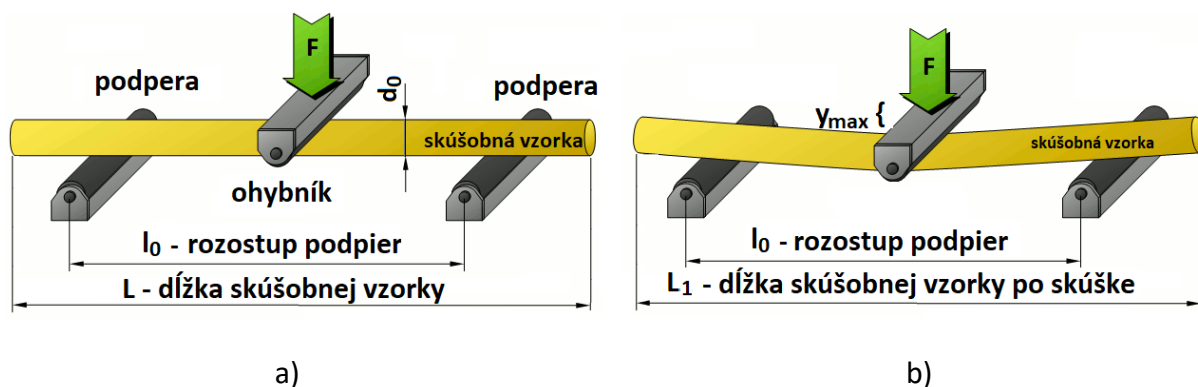
$$\delta_d = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (8.2)$$

a pomerné rozšírenie prierezu,

$$\varphi_d = \frac{A - A_0}{A_0} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (8.3)$$

## 2. Statická skúška v ohybe

Skúška ohybom materiálu umožňuje stanovenie pružnosti, ohybovej pevnosti, lomovej pevnosti a lomovej odolnosti materiálu. Tieto vlastnosti ukazujú správanie sa materiálu pod tlakom. Materiály, ktoré zlyhajú pod tlakom, môžu mať v budúcnosti nežiaduce následky. Napríklad v každom stavebnom procese je použitie tvárnej hmoty zaťaženej ohybovými silami vždy riziko. Statická skúška v ohybe sa realizuje iba pre krehké materiály. Skúškou sa stanoví pevnosť v ohybe. Pre skúšku sivej liatiny sa používajú neopracované tyče o rozmeroch závislých od hrúbky steny odliatku. Skúšobné telesá sa odlievajú vždy oddelene od odliatku do nedelených foriem na stojato z tej istej tavby ako odliatok. Pri skúškach v ohybe dochádza k deformácii v strede skúšobného materiálu a ohybová sila spôsobuje konkávny povrch alebo ohyb v dôsledku lomu. Sila sa aplikuje na skúšobnú vzorku v jej strede, aby sa vytvoril konkávny povrch s polomerom zakrivenia stanoveným podľa základnej normy. Skúška v ohybe sa vykonáva na univerzálnych ťhacích strojoch. Usporiadanie skúšobných vzoriek pre statickú skúšku ohybom je na obr. 8.2.



Obr. 8.2 Schéma statickej skúšky ohybom

a) skúšobná vzorka pred skúškou, b) skúšobná vzorka po skúške

Pevnosť v ohybe sa vyhodnocuje podľa vzťahu (8.4):

$$R_{md} = \frac{F_m \cdot l_0}{4 \cdot W} \quad [\text{MPa}] \quad (8.4)$$

Kde:  $F_m$  – je sila pri zlomení [N],  $l_0$  – rozostup podpier,  $W$  – modul prierezu v ohybe [ $m^3$ ], ktorý sa určí z rovnice (8.5):

$$W = \frac{\pi \cdot d_0^3}{32} \quad [m^3] \quad (8.5)$$

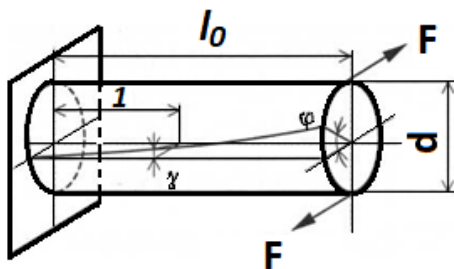
Kde:  $d_0$  – je menovitý priemer skúšobnej tyče [mm].

Pri statickej skúške ohybom sa môže určovať aj maximálny priehyb pri zlomení skúšobnej vzorky  $y_{max}$  v [mm] (Obr. 8.2b). Tento priehyb vyjadruje plasticnosť skúšaného materiálu. Hodnota  $Y_{max}$  u sivých liatin je cca. 8-9 mm.

### 3. Statická skúška v krútení

Skúška sa realizuje primárne pri hodnotení mechanických vlastností hriadeľov, tyčí a pružín v krútení. Namáhanie v krútení vzniká pri namáhaní tyče krútiacim momentom ( $M_k$ ) - čiže dvojicou síl, pôsobiacej v rovin kolmej na os tyče a sily majú opačný smer (Obr. 8.3). Krútiaci moment  $M_k$  sa vypočíta ako násobok sily  $F$  a ramena a pre prípad ramena silovej dvojice rovnajúcemu sa priemeru  $d$  bude:

$$M_k = F \cdot d \quad [N.m] \quad (8.6)$$



Obr. 8.3 Votknutý hriadeľ namáhaný krutom

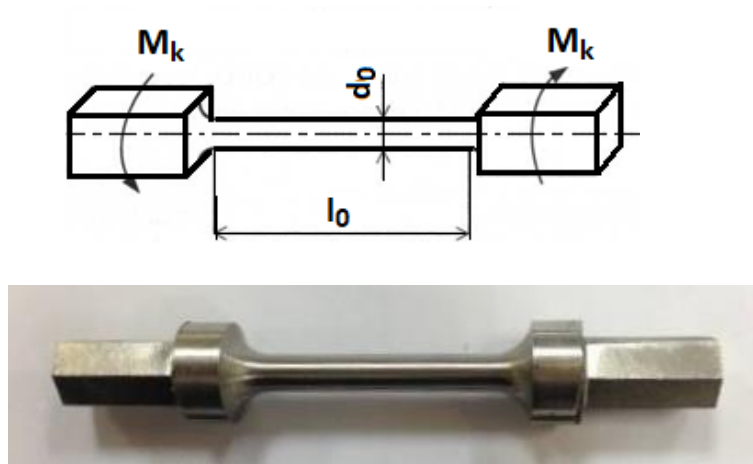
Skúšobné tyče (Obr. 8.4) majú kruhový prierez. Môžu byť ukončené štvorhranom resp. otvorom na upnutie pomocou čapu. Preferované sú skúšobné tyče priemeru  $d = 10 \text{ mm}$  dĺžky  $l_0 = 100 \text{ mm}$ .

Pri skúške sa určuje medza pevnosti v krútení  $\tau_{mk}$  podľa vzorca (8.7),

$$\tau_{mk} = \frac{M_{mk}}{W_k} \quad [MPa] \quad (8.7)$$

kde:  $M_{mk}$  je maximálny krútiaci moment spôsobujúci porušenie tyče,  $W_k$  je modul prierezu v krútení a pre kruhový prierez (8.8),

$$W_k = \frac{\pi d_0^3}{16} \quad [m^3] \quad (8.8)$$



Obr. 8.4 Skúšobná vzorka pre statickú skúšku v krútení

Okrem medze pevnosti v krútení  $\tau_{mk}$  pri skúške v pružnej oblasti deformácie sa môže určovať aj modul pružnosti v šmyku  $G$  z Hookovho zákona (8.9),

$$\tau = G_{\gamma} \quad [\text{MPa}] \quad (8.9)$$

kde:  $\tau$  je pomerné posunutie krajných vlákien (skos) vyrátané zo vzťahu (8.10),

$$\gamma = \varphi \frac{d_0}{2l_0} \quad [^\circ] \quad (8.10)$$

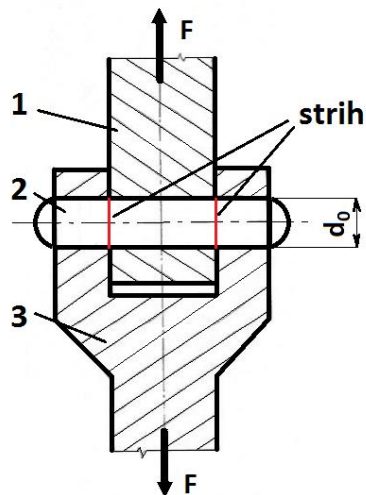
Pre určenie pomerného posunutia  $\gamma$  je potrebné merať uhol skrútenia  $\varphi$  na konci dĺžky skúšobnej tyče  $l_0$ . V rovnici (11) pre výpočet modulu pružnosti v šmyku  $G$  (nazývaný aj ako modul torzie) je uhol skrútenia  $\varphi$  udávaný v oblúkovej miere.

$$G = \frac{2l_0 \cdot \tau}{\varphi d_0} \quad [\text{N/m}^2] \quad (8.11)$$

#### 4. Statická skúška v strihu

Strihové napätie vzniká pôsobením paralelných síl opačne orientovaných, keď tieto nespôsobujú ohybové namáhanie. Statickou skúškou v strihu realizovanou na univerzálnych trhacích strojoch sú skúšané nity, skrutky, hriadele. Princíp skúšky skúšania nitov je prezentovaný na obr. 8.5. Do šmýkadla a vidlice je vložená skúšobná vzorka na ktorú pôsobí sila  $F$  do porušenia strihom. Pevnosť v strihu  $\tau_{ms}$  sa určí zo vzťahu (8.12):

$$\tau_{ms} = \frac{F_{max}}{2S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (8.12)$$



Obr. 8.5 Schéma skúšania kolíkov pomocou dvojitého strihu

1 – šmýkadlo, 2 – strihaný kolík (vzorka), 3 – vidlica

Počas skúšania strihom je potrebné zamedziť ohybu vzorky v prípravku a tak zabezpečiť pôsobenie iba tangenciálneho napätia. Skúšanie dvojitém strihom dáva presnejšie výsledky ako skúšky jednoduchým strihom.

### Úlohy:

- Realizujte a vyhodnoťte statickú skúšku v tlaku pre rôzne typy materiálov.
- Vykonajte statickú skúšku ohybom pre sivú a bielu liatinu.

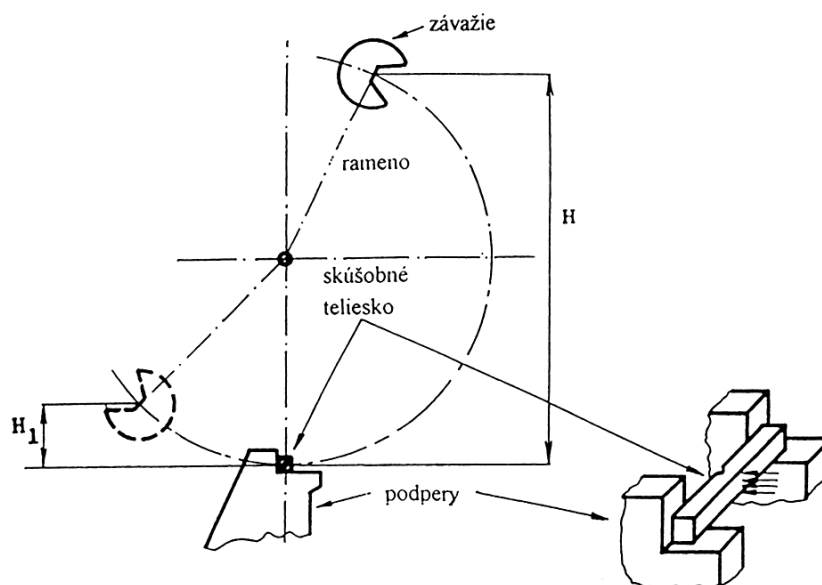
## Téma č. 9: MECHANICKÉ SKÚŠKY DYNAMICKÉ - SKÚŠKA RÁZOM V OHYBE

Niektoré materiály (predovšetkým kovy s kubickou priestorovo centrovanou mriežkou) pri zmene podmienok zaťažovania (teploty, stavu napätosti a rýchlosti zaťažovania) náhle prechádzajú z húževnatého do krehkého stavu. Húževnatosť materiálu je vyjadrená ako jeho schopnosť pohlcovať mechanickú energiu do porušenia. Vzhľadom na to, že jav prechodu (tranzitné správanie) je z praktického hľadiska veľmi nepriaznivá vlastnosť materiálu, bolo potrebné nájsť vhodné skúšobné metódy a kritériá na jej posúdenie.

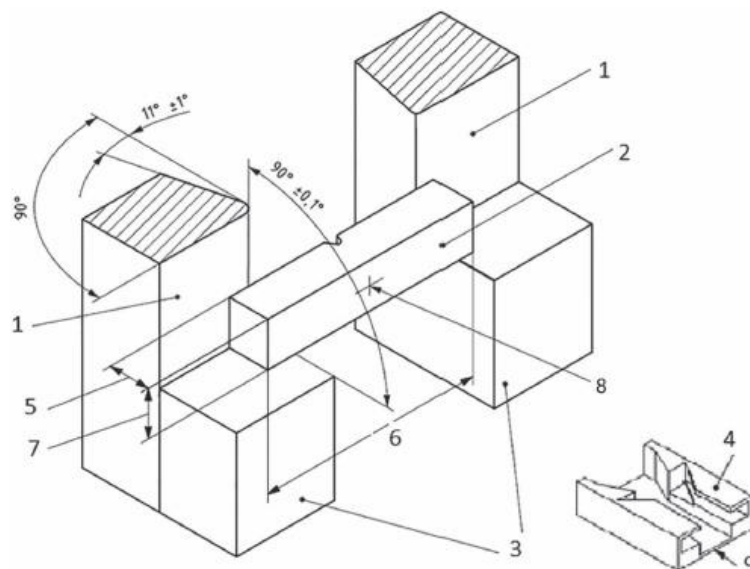
### Skúška rázom v ohybe

Najpoužívanejšia skúšobná metóda hodnotenia tranzitného správania materiálov je **skúška rázom v ohybe metódou Charpy**. Pri skúške sú obvykle určované *energie absorbovanej pri rázovej skúške, priečne rozšírenie tyče pod vrubom a vzhľad šmykového lomu*. Jej cieľom je zistiť hodnotu rázovej húževnatosti, ktorá je definovaná ako práca spotrebovaná na zlomenie skúšobného telieska s vrubom pri stanovených podmienkach skúšky. Rázová húževnatosť je daná podielom nárazovej práce  $K$  [J] a plochy priečného prierezu skúšobnej tyče  $S_0$  pred skúškou pod vrubom [ $\text{cm}^2$ ].

Postup skúšky je predpísaný normou STN EN ISO 148-1. Princíp skúšky spočíva v prerazení skúšobnej tyče s vrubom predpísaných tvarov a rozmerov jedným rázom kyvadlového kladiva za stanovených podmienok. Skúšobná tyč je umiestnená na dvoch podperách skúšobného stroja (vrub je na odvrátenej strane úderu). Údaje, odčítané zo skúšobného kladiva (systém Charpy) - obr.9.1, 9.3, ako aj rozmery a tvar skúšobnej tyče pred a po skúške, sú podkladom na vyhodnotenie skúšky a stanovenie charakteru lomovej plochy. Tvar, rozmery a označovanie skúšobných tyčí je na obr.9.5 a 9.6 a v Tab. 9.1 sú medzné odchýlky označených rozmerov skúšobných tyčí.



Obr.9.1 Schéma kyvadlového kladiva



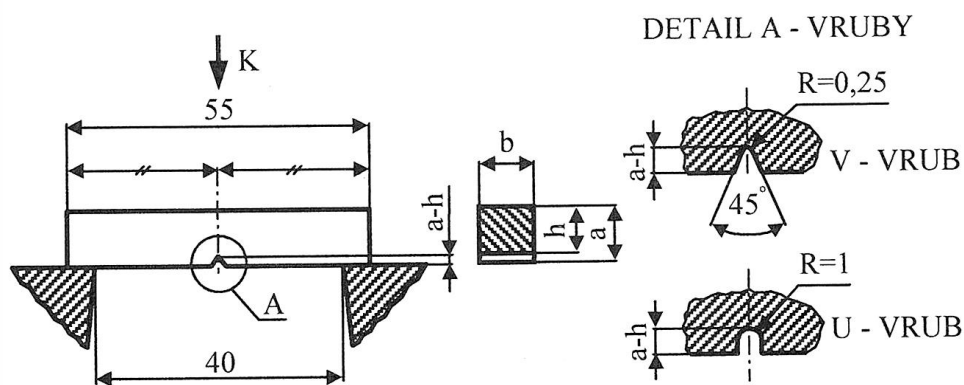
Obr.9.2 Terminológia konfigurácie skúšobnej tyče, podpier skúš. stroja pre skúšku rázom  
1-opora, 2-štandardná skúšobná tyč, 3-podpery skúšobnej tyče, 4-vodítko, 5-šírka skúšobnej tyče W, 6-dĺžka skúš. tyče L, 7-hrúbka skúšobnej tyče B, 8-stred rázu, 9-smer pohybu kyvadla



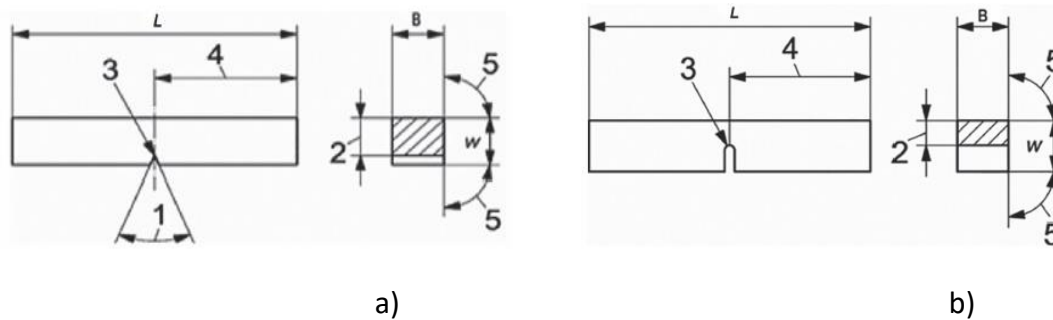
Obr.9.3 Charpyho kladivo



Obr.9.4 Skúšobná tyč pre skúšku rázom v ohybe



Obr.9.5 Charakteristické rozmery a tvar skúšobných tyčí pre skúšku rázom v ohybe



Obr.9.6 Skúšobná tyč pre skúšky rázom v ohybe typ Charpy. Geometria a) V-vrubu, b) U-vrubu; Značky L, W, B a čísla 1 – 5, viď. Tab.9.1

Tab. 9.1 Medzné odchýlky označených rozmerov skúš. tyčí v zmysle STN EN ISO 148-1

| Označenie                                                         | Značka a číslo | Skúšobná tyč s V-vrubom |                         |                                | Skúšobná tyč s U-vrubom |                         |                                |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
|                                                                   |                | Menovitý rozmer         | Výrobné medzné odchýlky |                                | Menovitý rozmer         | Výrobné medzné odchýlky |                                |
|                                                                   |                |                         |                         | Trieda tolerancie <sup>a</sup> |                         |                         | Trieda tolerancie <sup>a</sup> |
| Dĺžka                                                             | L              | 55 mm                   | ±0,60 mm                | js15                           | 55 mm                   | ±0,60 mm                | js15                           |
| Šírka                                                             | W              | 10 mm                   | ±0,075 mm               | js12                           | 10 mm                   | ±0,11 mm                | js13                           |
| Hrúbka <sup>c</sup>                                               | B              | 10 mm                   | ±0,11 mm                | jb13                           | 10 mm                   | ±0,11 mm                | js13                           |
| - štandardná skúšobná tyč                                         |                | 10 mm                   | ±0,11 mm                | js13                           | 10 mm                   | ±0,11 mm                | js13                           |
| - neštandardná skúšobná tyč                                       |                | 7,5 mm                  | ±0,11 mm                | js13                           | 7,5 mm                  | ±0,11 mm                | -                              |
| - neštandardná skúšobná tyč                                       |                | 5 mm                    | ±0,06 mm                | js12                           | 5 mm                    | ±0,06 mm                | -                              |
| - neštandardná skúšobná tyč                                       |                | 2,5 mm                  | ±0,05 mm                | js12                           | -                       | -                       | -                              |
| Uhol vrubu                                                        | 1              | 45°                     | ±2°                     | -                              | -                       | -                       | -                              |
| Šírka pod vrubom                                                  | 2              | 8 mm                    | ±0,075 mm               | js12                           | 5 mm                    | ±0,09 mm                | js13                           |
| Polomer vrubu                                                     | 3              | 0,25 mm                 | ±0,025 mm               | -                              | 1 mm                    | ±0,07 mm                | js12                           |
| Poloha vrubu                                                      | 4              | 27,5 mm                 | ±0,42 mm                | js15                           | 27,5 mm                 | ±0,42 mm                | js15                           |
| Uhol medzi rovinou symetrie vrubu a pozdĺžnou osou skúšobnej tyče |                | 90°                     | ±2°                     | -                              | 90°                     | ±2°                     | -                              |
| Uhol medzi pozdĺžnymi priľahlými povrchmi skúšobnej tyče          | 5              | 90°                     | ±2°                     | -                              | 90°                     | ±2°                     | -                              |

|                                                                                                                                                                                                            |                |        |  |  |        |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------|--|--|--------|--|--|
| Drsnosť<br>povrchu <sup>b</sup>                                                                                                                                                                            | neuvádza<br>sa | < 5 μm |  |  | < 5 μm |  |  |
| <sup>a</sup> v súlade s ISO 286-1.<br><sup>b</sup> Skúšobná tyč musí mať drsnosť povrchu lepšiu ako Ra = 5 μm s výnimkou koncov.<br><sup>c</sup> pokiaľ je daná odlišná hrúbka (2 mm alebo 3 mm), je nutné |                |        |  |  |        |  |  |

Skúšobný protokol musí obsahovať nasledujúce informácie:

- odkaz na platnú normu,
- identifikáciu skúšobnej tyče (napr. druh materiálu, číslo tavby),
- veľkosť skúšobnej tyče pokiaľ je odlišná od štandardnej skúšobnej tyče,
- teplotu skúšky alebo temperovaniu teplotu skúšobných vzoriek,
- príslušnú hodnotu absorbovanej energie KV<sub>2</sub>, KV<sub>8</sub>, KU<sub>2</sub> alebo KU<sub>8</sub>,
- informáciu, či daná vzorka resp. skupina vzoriek boli rozlomené
- akékoľvek abnormality, ktoré mohli ovplyvniť skúšku.

Voliteľné informácie:

- orientácia skúšobných tyčí (vid'. ISO 3785),
- počiatočná potenciálna energia skúšobného stroja v jauloch,
- hodnota priečneho rozšírenia,
- percentuálny podiel šmykového lomu v lomovej ploche,
- krivku teplotnej závislosti absorbovanej energie,
- krivku teplotnej závislosti priečneho rozšírenia tyče pod vrubom,
- krivku teplotnej závislosti podielu šmykového lomu v lomovej ploche,
- tranzitnú teplotu (teploty) a kritériá použité pre jej stanovenie,
- počet skúšobných tyčí, ktoré neboli pri skúške celkom prerazené,
- dátum (mesiac a rok) predchádzajúceho priameho a nepriameho overovania,
- neistotu merania absorbovanej energie.

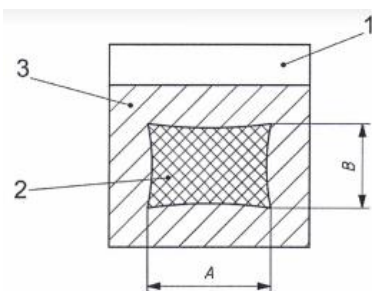
Písmeno V alebo U sa používa pre označenie geometrie vrubu, t.j. KV alebo KU. Číslica 2 alebo 8 sa používa ako dolný index označujúci polomer hrotu úderníka kyvadla, *napr. KV<sub>2</sub> je absorbovaná energia v prípade skúšobnej tyče s V-vrubom pri použití hrotu o polomere 2 mm; KU<sub>8</sub> je absorbovaná energia v prípade skúšobnej tyče s U-vrubom pri použití hrotu o polomere 8 mm.* Hodnoty pri ráze sa u materiálov menia s teplotou, preto musia byť skúšky realizované pri teplote 23°C ±5°C (teplota okolia). Ak sa jedná o inú teplotu ako je teplota okolia, musí byť skúšobná tyč ohriata alebo ochladená na danú teplotu pri riadených podmienkach s presnosťou do ±2°C.

Doplnením výsledku rázovej skúšky v ohybe je vyhodnotenie lomovej plochy tyče po skúške. Spravidla sa vyhodnocuje podiel tvárnej (húževnatej) časti lomu na celkovej lomovej ploche PHL v %.

Percento šmykového lomu sa obecné určuje ľubovoľnou metódou z nasledujúcich:

- zmeria sa dĺžka a šírka štiepnej časti (lesklé časti) lomovej plochy, vid'. Obr. 9.7 a určí sa percento šmykového lomu z Tab.9.2,

- porovná sa vzhľad lomu skúšobnej tyče s diagramom vzhľadu lomu, aký je uvedený napr. na Obr.9.8,
- zväčší sa lomová plocha a porovná sa s vopred kalibrovaným diagramom alebo sa zmeria percento štiepneho lomu planimetrom a potom sa vypočíta percento šmykového lomu (ako 100% mínus percentá štiepneho lomu),
- zdokumentuje sa lomová plocha vo vhodnom zväčšení a zmeria sa percento štiepneho lomu pomocou planimetru, potom sa vypočítajú percentá šmykového lomu (ako 100% mínus percentá štiepneho lomu),
- percentá šmykového lomu sa zmerajú technikami obrazovej analýzy.



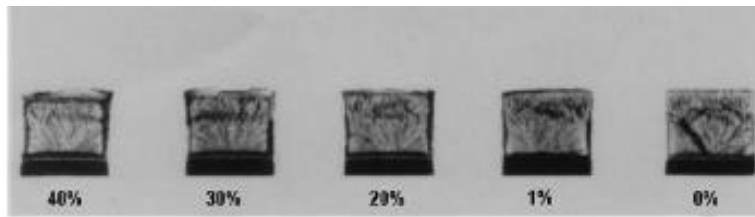
Obr.9.7 Určenie percenta šmykového lomu

1-vrub, 2-štiepna plocha (krehká), 3-šmyková plocha (matná), A-rozmer meraný za účelom odhadu štiepnej plochy, B-rozmer meraný za účelom odhadu štiepnej plochy, Rozmery A a B sa merajú s presnosťou 0,5 mm.

Tab.9.2 Percentá šmykového lomu pri meraní v milimetroch

Pokiaľ A a B sú rovné nule, musí sa do protokolu uviesť, že sa jedná o 100% šmykového lomu.

| B<br>mm | A<br>mm                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |  |
|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|--|
|         | 1,0                     | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 | 8,5 | 9,0 | 9,5 | 10 |  |
|         | Procenta smykového lomu |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |  |
| 1,0     | 99                      | 98  | 98  | 97  | 96  | 96  | 95  | 94  | 94  | 93  | 92  | 92  | 91  | 91  | 90  | 89  | 89  | 88  | 88 |  |
| 1,5     | 98                      | 97  | 96  | 95  | 94  | 93  | 92  | 92  | 91  | 90  | 89  | 88  | 87  | 86  | 85  | 84  | 83  | 82  | 81 |  |
| 2,0     | 98                      | 96  | 95  | 94  | 92  | 91  | 90  | 89  | 88  | 86  | 85  | 84  | 82  | 81  | 80  | 79  | 77  | 76  | 75 |  |
| 2,5     | 97                      | 95  | 94  | 92  | 91  | 89  | 88  | 86  | 84  | 83  | 81  | 80  | 78  | 77  | 75  | 73  | 72  | 70  | 59 |  |
| 3,0     | 96                      | 94  | 92  | 91  | 89  | 87  | 85  | 83  | 81  | 79  | 77  | 76  | 74  | 72  | 70  | 68  | 66  | 64  | 52 |  |
| 3,5     | 96                      | 93  | 91  | 89  | 87  | 85  | 82  | 80  | 78  | 76  | 74  | 72  | 69  | 67  | 65  | 63  | 61  | 58  | 56 |  |
| 4,0     | 95                      | 92  | 90  | 88  | 85  | 82  | 80  | 77  | 75  | 72  | 70  | 67  | 65  | 62  | 60  | 57  | 55  | 52  | 50 |  |
| 4,5     | 94                      | 92  | 89  | 86  | 83  | 80  | 77  | 75  | 72  | 69  | 66  | 63  | 61  | 58  | 55  | 52  | 49  | 46  | 44 |  |
| 5,0     | 94                      | 91  | 88  | 85  | 81  | 78  | 75  | 72  | 69  | 66  | 62  | 59  | 56  | 53  | 50  | 47  | 44  | 41  | 37 |  |
| 5,5     | 93                      | 90  | 86  | 83  | 79  | 76  | 72  | 69  | 66  | 62  | 59  | 55  | 52  | 48  | 45  | 42  | 38  | 35  | 31 |  |
| 6,0     | 92                      | 89  | 85  | 81  | 77  | 74  | 70  | 66  | 62  | 59  | 55  | 51  | 47  | 44  | 40  | 36  | 33  | 29  | 25 |  |
| 6,5     | 92                      | 88  | 84  | 80  | 76  | 72  | 67  | 63  | 59  | 55  | 51  | 47  | 43  | 39  | 35  | 31  | 27  | 23  | 19 |  |
| 7,0     | 91                      | 87  | 82  | 78  | 74  | 69  | 65  | 61  | 56  | 52  | 47  | 43  | 39  | 34  | 30  | 26  | 21  | 17  | 12 |  |
| 7,5     | 91                      | 86  | 81  | 77  | 72  | 67  | 62  | 58  | 53  | 48  | 44  | 39  | 34  | 30  | 25  | 20  | 16  | 11  | 8  |  |
| 8,0     | 90                      | 85  | 80  | 75  | 70  | 65  | 60  | 55  | 50  | 45  | 40  | 35  | 30  | 25  | 20  | 15  | 10  | 5   | 0  |  |



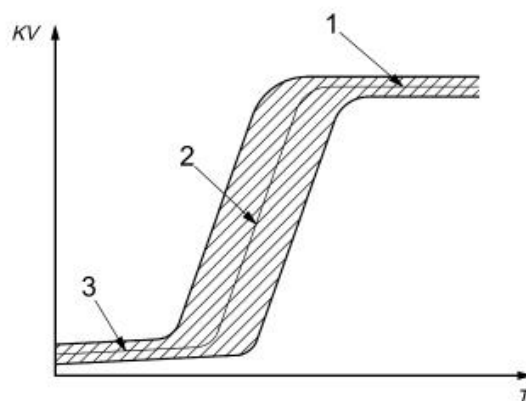
a)



b)

Obr.9.8 Vzhľad lomu; a) Diagram vzhľadu lomov a porovnanie percent šmykového lomu, b) Vodítko pre odhad vzhľadu lomu

Rázová húževnatosť ako kritérium odolnosti proti krehkému lomu má praktický význam v podobe prechodovej (tranzitnej) krivky, ktorá vyjadruje závislosť rázovej húževnatosti od teploty. Znižovaním skúšobnej teploty v určitom teplotnom intervale poklesne húževnatosť z maximálnej hodnoty na minimálnu hodnotu. Tento interval sa nazýva *prechodová oblasť* a krivka, pri ktorej je tento pokles výrazný, *prechodovou* alebo *tranzitnou* krivkou.



Obr.9.9 Schematická krivka teplotnej závislosti absorbovanej energie; T-teplota, K-absorbovaná energia, 1-oblasť horných prahových hodnôt, 2-prechodová oblasť, 3-oblasť spodných prahových hodnôt

### Úloha:

Vykonajte skúšku rázom v ohybe daného materiálu:

1. Zmerajte rozmery skúšobných vzoriek.
2. Na pripravených skúšobných vzorkách realizujte skúšku rázom v ohybe na Charpyho kladivo a stanovte hodnotu absorbovanej energie.
3. Vyhodnoťte typ lomu.
4. Vypracujte protokol o skúške.

## Téma č. 10: Mechanické skúšky statické – skúšky tvrdosti materiálov

Pod pojmom **mechanické slúšky** rozumieme skúšky mechanických vlastností materiálov, ktoré sa zisťujú pomocou mechanického namáhania materiálu spôsobom, zodpovedajúcim testovanej vlastnosti.

Pojem **statická skúška** poukazuje na dynamiku pôsobenia zaťažujúcej sily pri skúške. Pod statickou skúškou rozumieme, že zaťažujúca sila vzrastá od nuly postupne roznomernou rýchlosťou po konkrétnu hodnotu, alebo po deštrukciu skúšobnej vzorky. Pôsobenie sily na materiál je teda postupné, rovnomerne sa zvyšujúce, bez rázov a náhlych zmien. **Tvrdosť** patrí medzi **mechanické vlastnosti** materiálov, súvisí najmä s odolnosťou materiálu voči opotrebeniu.

**Tvrdosť** je veľmi dôležitá mechanická vlastnosť kovov a zliatin. Je definovaná ako odolnosť materiálu voči plastickej deformácii, spôsobenej indentáciou (vtláčaním) geometricky definovaného telesa (indentora) do jeho povrchu.

Tab. 10.1 Mohsova stupnica tvrdosti

| stupeň | nerast              | vlastnosť                                                           | chemický vzorec                                                    | sústava      |
|--------|---------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1      | mastenec            | dajú sa strúhať nechtom, na dotyk sú často jemné a hebké            | $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$                 | monoklinická |
| 2      | halit (kamenná soľ) | tiež možno čiastočne poškodiť nechtom                               | $\text{NaCl}$                                                      | kubická      |
| 3      | kalcit              | do tvrdosti tretieho stupňa možno rýpať medenou mincou alebo drôtom | $\text{CaCO}_3$                                                    | romboédrická |
| 4      | fluorit             | možno rýpať oceľovým nožom                                          | $\text{CaF}_2$                                                     | kubická      |
| 5      | apatit              | možno rýpať oceľovým nožom                                          | $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}^-, \text{Cl}^-, \text{F}^-)$ | hexagonálna  |
| 6      | ortoklas (živec)    | minerály s tvrdosťou vyššou ako 6 rýpu do skla                      | $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$                                         | monoklinická |
| 7      | kremeň              | minerály s tvrdosťou vyššou ako 6 rýpu do skla                      | $\text{SiO}_2$                                                     | hexagonálna  |
| 8      | topás               | nemožno rýpať ani pilníkom, pri kresaní často iskria                | $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}^-, \text{F}^-)_2$               | ortorobická  |
| 9      | korund              | nemožno rýpať ani pilníkom, pri kresaní často iskria                | $\text{Al}_2\text{O}_3$                                            | romboédrická |
| 10     | diamant             | nemožno rýpať ani pilníkom, pri kresaní často iskria                | $\text{C}$                                                         | kubická      |

Prvým jednoduchým testom na zisťovanie tvrdosti materiálov, najmä minerálov, bol **Mohsov test tvrdosti**. Friedrich Mohs zostavil Mohsovu stupnicu tvrdosti, Tab. 10.1. Stupnica sa skladá z desiatich minerálov, usporiadaných vzostupne podľa ich tvrdosti. Mierou tvrdosti

minerálu bola jeho odolnosť proti poškriabaniu iným minerálom. Podľa Mohsovo princípu sa stanoví tvrdosť tak, že ak je na materiáli možné urobiť ryhu minerálom č.7, ale minerálom č. 6 nie, tvrdosť neznámeho materiálu leží medzi stupňom 6 a 7 Mohsovej stupnice. Hlavnou nevýhodou Mohsovej stupnice je, že poskytuje len kvalitatívne, veľmi hrubé výsledky a je nerovnomerne rozdelená.

Z dôvodu nedostatočnosti a nízkej rozlišovacej schopnosti Mohsovej stupnice boli vyvinuté presnejšie skúšobné metódy s kvantitatívnym výstupom.

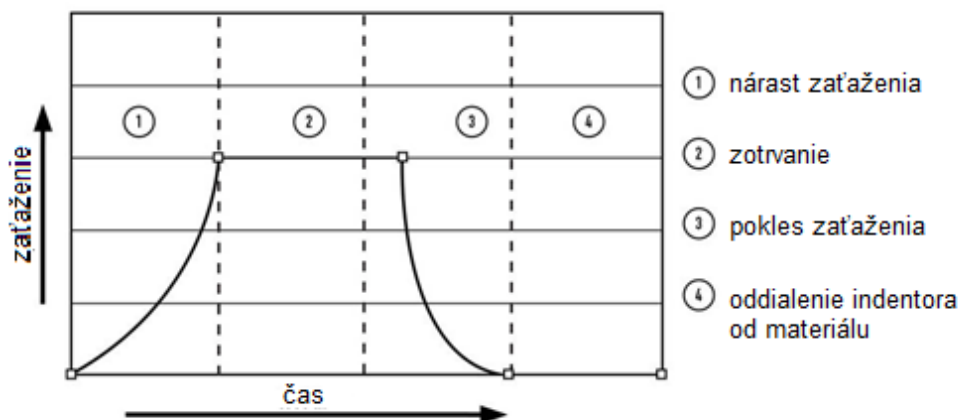
#### Rozdelenie skúšok tvrdosti:

##### ➤ Podľa účelu merania:

- **Skúšky makrotvrdosti** – skúšobné zaťaženie sa volí od 1 kg (9,807 N) a vyššie, vtlačok zasahuje väčšie množstvo zŕn, výsledok odráža tvrdosť materiálu ako celku, bez ohľadu na tvrdosť jednotlivých štruktúrnych zložiek.
- **Skúšky mikrotvrdosti** – skúšobné zaťaženie sa volí od 0.01 do 2 kg (od 98,07 mN do 19,614 N), charakteristický rozmer vtlačku je približne 50  $\mu\text{m}$ , čo umožňuje merať tvrdosť jednotlivých fáz a štruktúrnych zložiek

##### ➤ Podľa princípu merania:

- **Vrypové skúšky** – diamantový hrot s danou geometriou je zaťažený konštantnou normálovou silou a súčasne sa lineárne pohybuje po povrchu meraného materiálu rovnomernou rýchlosťou. Tvrdosť materiálu sa hodnotí podľa šírky vzniknutého vrypu.
- **Vtláčacie skúšky** – podstatou metód je meranie veľkosti vtlačku, ktorý vznikol vtláčaním indentora do materiálu pri danom zaťažení.
- **Odrázové skúšky** – tvrdosť sa meria nepriamo na základe úbytku energie telieska dopadajúceho z výšky na povrch meraného materiálu.



Obr. 10.1 Priebeh zaťaženia pri skúške tvrdosti

➤ **Podľa rýchlosti zaťažovania:**

- **Statické metódy** – zaťaženie indentora postupne narastá, po dosiahnutí želanej sily nasleduje zotrvanie na danej úrovni zaťaženia a potom nasleduje znižovanie sily až k nule, obr. 10.1.
- **dynamické metódy** – zaťažujúca sila pôsobí naraz v plnej výške, materiál je teda zaťažený rázom.

➤ **Podľa typu deformácie na meranom povrchu:**

- **metódy vyvolávajúce pružnú deformáciu** - skúšobná metóda spôsobí na meranom povrchu iba pružnú deformáciu, teda nezanechá na povrchu viditeľnú stopu (odrazové metódy)
- **metódy vyvolávajúce plastickú deformáciu** - skúšobná metóda spôsobí na meranom povrchu trvalú plastickú deformáciu (vrypové a indentačné metódy)

V praxi sú najpoužívanéjšie nasledovné vtláčacie metódy merania tvrdosti.

### Skúška tvrdosti podľa Brinella

#### Premenné:

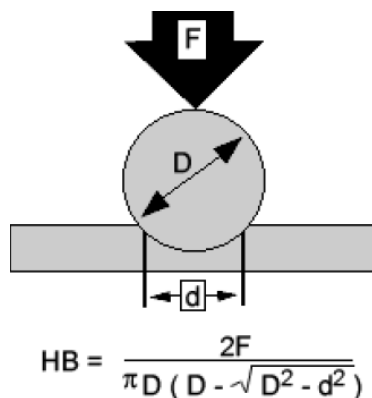
- tvar indentora – kalená oceľová guľôčka (označenie **S**) alebo guľôčka zo spekaného karbidu (označenie **W**)
- priemer guľôčky: 10; 5; 2,5; 2; 1 mm
- skúšobné zaťaženie  $F$
- čas zotrvania

**Cieľom skúšky** je meranie **veľkosti** vtlačku, ktorý vznikol pôsobením zvoleného zaťaženia a času zotrvania. Veľkosť vtlačku sa následne konvertuje do jednotiek tvrdosti.

#### Postup:

- Indentor je vtláčaný do vhodne pripraveného povrchu zvoleným zaťažením, obr. 10.2.
- Po dosiahnutí zvoleného zaťaženia nasleduje fáza zotrvania na danej úrovni zaťaženia. Čas zotrvania je pre zliatiny železa 10 až 15 sekúnd a pre zliatiny neželezných kovov 10 až 180 sekúnd.
- Po ukončení zotrvania sa indentor vzdiali od meraného povrchu, pričom na ňom zanechá trvalú stopu – vtlačok.
- Veľkosť vtlačku sa stanoví opticky meraním priemeru vtlačku v dvoch vzájomne kolmých smeroch.

- Výslednú Brinellovu tvrdosť je možné vypočítať ako podiel zaťažujúcej sily a plochy vytvoreného vtlačku, obr. x. V praxi sa hodnota tvrdosti určí zo spracovaných tabuliek na základe veľkosti vtlačku, priemeru guľôčky a zaťažujúcej sily.



Obr. 10.2 Princíp skúšky tvrdosti podľa Brinella, výpočet tvrdosti

**Zápis výsledku skúšky tvrdosti podľa Brinella má nasledujúce konvencie:**

- počet jednotiek tvrdosti HBW D/F/t\* alebo
- počet jednotiek tvrdosti HBS D/F/t\*

\* údaj o čase zotrvania sa udáva len ak sa líši od štandardnej hodnoty 10-15 s

**Príklad zápisu výsledku skúšky:**

**180 HBS 10/30/30**

180 jednotiek tvrdosti stanovených Brinellovou metódou s použitím ocelevej kalenej guľôčky s priemerom 10 mm, skúšobným zaťažením 30 kp (294,3 N) a časom zotrvania 30 s

**250 HBW 5/30**

250 jednotiek tvrdosti stanovených Brinellovou metódou s použitím guľôčky zo spekaného karbidu s priemerom 5 mm, so skúšobným zaťažením 30 kp (294,3 N) a časom zotrvania 10 s

### Skúška tvrdosti podľa Vickersa

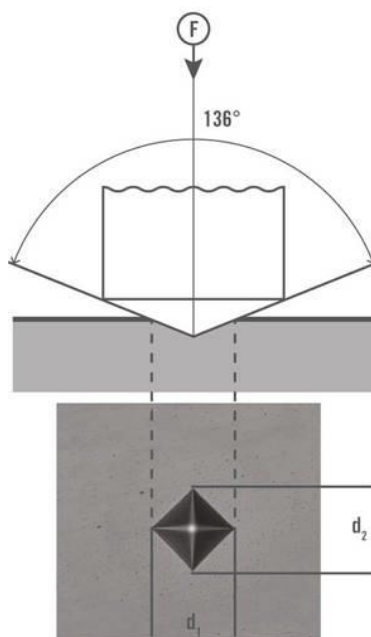
**Premenné:**

- tvar indentora – pravidelný štvorboký ihlan s vrcholovým uhlom 136°
- skúšobné zaťaženie F
- čas zotrvania

**Cieľom skúšky** je meranie **veľkosti** vtlačku, ktorý vznikol pôsobením zvoleného zaťaženia a času zotrvania. Veľkosť vtlačku sa následne konvertuje do jednotiek tvrdosti.

**Postup:**

- Indentor je vtlačaný do vhodne pripraveného povrchu zvoleným zaťažením, obr. 10.3.
- Po dosiahnutí zvoleného zaťaženia nasleduje fáza zotrvania na danej úrovni zaťaženia. Čas zotrvania je pre zliatiny železa 10 až 15 sekúnd a pre zliatiny neželezných kovov 10 až 180 sekúnd.
- Po ukončení zotrvania sa indentor vzdiali od meraného povrchu, pričom na ňom zanechá trvalú stopu – vtlačok.
- Veľkosť vtlačku sa stanoví opticky meraním dĺžky oboch diagonál priemetu vtlačku tvaru štvorca ( $d_1$  a  $d_2$  v mm), obr. x.
- Z dĺžky diagonál sa vypočíta priemerná hodnota a Vickersova tvrdosť sa určí zo spracovaných tabuliek na základe veľkosti vtlačku a zaťažujúcej sily.



Obr. 10.3 Princíp skúšky tvrdosti podľa Vickersa, meranie dĺžky diagonál

**Zápis výsledku skúšky tvrdosti podľa Vickersa má nasledujúce konvencie:**

- počet jednotiek tvrdosti HV F/t\*

\* údaj o čase zotrvania sa udáva len ak sa líši od štandardnej hodnoty 10-15 s

**Príklad zápisu výsledku skúšky:**

**620 HV 30/30**

620 jednotiek tvrdosti stanovených Vickersovou metódou pri skúšobnom zaťažení 30 kp (294,3 N) a časom zotrvania 30 s

**250 HV 0.1**

250 jednotiek tvrdosti stanovených Vickersovou metódou pri skúšobnom zaťažení 0,1 kp (980,7 mN) a časom zotrvania 10 s

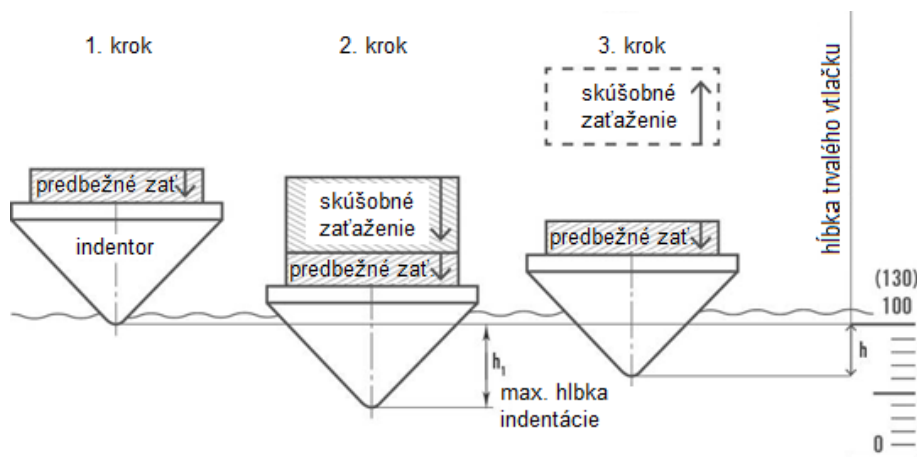
**Skúška tvrdosti podľa Rockwella****Premenné:**

- tvar indentora – oceľová guľôčka s priemerom 1/2“, 1/4“, 1/8“ or 1/16“ alebo diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom 120°
- predbežné a skúšobné zaťaženie, pričom ich súčet sa nazýva celkové zaťaženie
- čas zotrvania

**Cieľom skúšky** je meranie **hlbky** trvalého vtlačku, ktorý vznikol pôsobením zvoleného zaťaženia a času zotrvania. Hĺbka vtlačku sa následne konvertuje do jednotiek tvrdosti.

**Postup (Obr. 10.4):**

- indentor sa dotkne pripraveného povrchu
- indentor sa zaťaží predbežným zaťažením a nastaví sa východisková – nulová pozícia indentora (1. krok)
- k predbežnému zaťaženiu sa pridá skúšobné zaťaženie a spolu pôsobia na materiál stanovený čas (2. krok)
- po ukončení času zotrvania prestane pôsobiť skúšobné zaťaženie, indentor ostane zaťažený iba predbežným zaťažením. Odstránenie skúšobného zaťaženia spôsobí mierne zmenšenie hĺbky vtlačku v dôsledku relaxácie materiálu a pružnej deformácie.
- nakoniec sa zaznamená hĺbka trvalého vtlačku (3. krok)



Obr. 10.4 Princíp skúšky tvrdosti podľa Rockwella, meranie hĺbky vtlačku

**Tvrdosť podľa Rockwella je vyjadrená ako kombinácia počtu jednotiek tvrdosti, symbolov HR (hardness Rockwell) doplnených symbolom stupnice, v ktorom je zakódovaný typ použitého indenta, ako aj veľkosť predbežného a skúšobného zaťaženia, Tab. 10.2.** Číselné vyjadrenie tvrdosti podľa Rockwella je vlastne rozdiel v počte dielikov medzi nulovou pozíciou indenta a hĺbkou trvalého vtlačku.

Tab. 10.2 Stupnice Rockwellovej skúšky tvrdosti

| stupnica   | indenter      | predbežné zaťaženie |    | celkové zaťaženie |     | typické použitie                                                       |
|------------|---------------|---------------------|----|-------------------|-----|------------------------------------------------------------------------|
|            |               | N                   | kg | N                 | kg  |                                                                        |
| <b>A</b>   | kužeľ         | 98,07               | 10 | 588,4             | 60  | Spekaný karbid, tenká oceľ, cementovaná oceľ                           |
| <b>B</b>   | Guľôčka 1/16" | 98,07               | 10 | 980,7             | 100 | Zliatiny, Cu, mäkké ocele, zliatiny Al, temperovaná liatina            |
| <b>C</b>   | kužeľ         | 98,07               | 10 | 1471              | 150 | Oceľ, tvrdé liatiny, Ti, materiály tvrdšie než HRB 100                 |
| <b>D</b>   | kužeľ         | 98,07               | 10 | 980,7             | 100 | Tenka oceľ a stredne cementovaná oceľ, perlitická temperovaná liatina  |
| <b>E</b>   | Guľôčka 1/8"  | 98,07               | 10 | 980,7             | 100 | Liatina, zliatiny Al a Mg, ložiskové kovy                              |
| <b>F</b>   | Guľôčka 1/16" | 98,07               | 10 | 588,4             | 60  | Žíhané zliatiny Cu, tenké mäkké plechy                                 |
| <b>G</b>   | Guľôčka 1/16" | 98,07               | 10 | 1471              | 150 | Temperovaná liatina, zliatiny Cu-Ni-Zn                                 |
| <b>H</b>   | Guľôčka 1/8"  | 98,07               | 10 | 588,4             | 60  | Al, Zn, Pb                                                             |
| <b>K</b>   | Guľôčka 1/8"  | 98,07               | 10 | 1471              | 150 | Ložiskové a iné veľmi mäkké a tenké materiály                          |
| <b>L</b>   | Guľôčka 1/4"  | 98,07               | 10 | 588,4             | 60  |                                                                        |
| <b>M</b>   | Guľôčka 1/4"  | 98,07               | 10 | 980,7             | 100 |                                                                        |
| <b>P</b>   | Guľôčka 1/4"  | 98,07               | 10 | 1471              | 150 |                                                                        |
| <b>R</b>   | Guľôčka 1/2"  | 98,07               | 10 | 588,4             | 60  |                                                                        |
| <b>S</b>   | Guľôčka 1/2"  | 98,07               | 10 | 980,7             | 100 |                                                                        |
| <b>V</b>   | Guľôčka 1/2"  | 98,07               | 10 | 1471              | 150 |                                                                        |
| <b>15N</b> | kužeľ         | 29,42               | 3  | 147,1             | 15  | Podobne ako u stupníc A, C a D, ale pre tenšie a cementované materiály |
| <b>30N</b> | kužeľ         | 29,42               | 3  | 294,2             | 30  |                                                                        |
| <b>45N</b> | kužeľ         | 29,42               | 3  | 441,3             | 45  |                                                                        |
| <b>15T</b> | Guľôčka 1/16" | 29,42               | 3  | 147,1             | 15  | Podobne ako u stupníc B, F a G, ale pre tenšie materiály               |
| <b>30T</b> | Guľôčka 1/16" | 29,42               | 3  | 294,2             | 30  |                                                                        |
| <b>45T</b> | Guľôčka 1/16" | 29,42               | 3  | 441,3             | 45  |                                                                        |
| <b>15W</b> | Guľôčka 1/8"  | 29,42               | 3  | 147,1             | 15  | Veľmi mäkké materiály                                                  |
| <b>30W</b> | Guľôčka 1/8"  | 29,42               | 3  | 294,2             | 30  |                                                                        |
| <b>45W</b> | Guľôčka 1/8"  | 29,42               | 3  | 441,3             | 45  |                                                                        |
| <b>15X</b> | Guľôčka 1/4"  | 29,42               | 3  | 147,1             | 15  |                                                                        |
| <b>30X</b> | Guľôčka 1/4"  | 29,42               | 3  | 294,2             | 30  |                                                                        |
| <b>45X</b> | Guľôčka 1/4"  | 29,42               | 3  | 441,3             | 45  |                                                                        |
| <b>15Y</b> | Guľôčka 1/2"  | 29,42               | 3  | 147,1             | 15  |                                                                        |
| <b>30Y</b> | Guľôčka 1/2"  | 29,42               | 3  | 294,2             | 30  |                                                                        |
| <b>45Y</b> | Guľôčka 1/2"  | 29,42               | 3  | 441,3             | 45  |                                                                        |

**Príklad zápisu výsledku skúšky:****75 HRA**

75 jednotiek tvrdosti stanovených Rockwellovou metódou, stupnica A: indentor – diamantový kužeľ, predbežné zaťaženie 10 kg (98.07 N), celkové zaťaženie 60 kg (588.4 N)

**28 HRB**

28 jednotiek tvrdosti stanovených Rockwellovou metódou, stupnica B: indentor – oceľová guľôčka priemeru 1/16" (1.588 mm), predbežné zaťaženie 10 kg (98.07 N), celkové zaťaženie 100 kg (980.7 N)

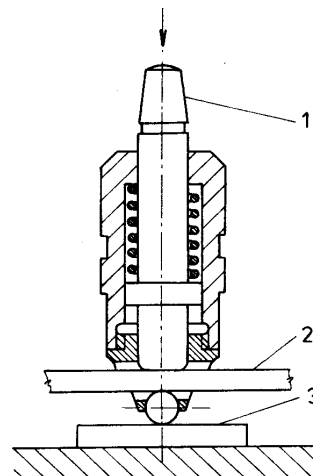
**60 HRC**

60 jednotiek tvrdosti stanovených Rockwellovou metódou, stupnica C: indentor – diamantový kužeľ, predbežné zaťaženie 10 kg (98.07 N), celkové zaťaženie 150 kg (1471 N)

**Brinellova a Vickersova** metóda si vyžadujú **prípravu povrchu materiálu brúsením a leštením**, aby sa mohol lúč svetla z optického systému prístroja odraziť od povrchu a zobrazíť tak vtlačok.

Na meranie tvrdosti veľkých konštrukcií, nádrží a pod. priamo na mieste bolo vyvinuté prenosné zariadenie na meranie tvrdosti – **Poldi kladivko**.

Meracia metóda je jednoduchá a rýchla, vhodná na testovanie ťažkých odliatkov a iných komponentov, ktoré nie je možné umiestniť na stolové meracie zariadenie. Skúšobné zaťaženie sa aplikuje úderom kladiva na kladivko s vloženou referenčnou skúšobnou tyčou známej tvrdosti cez kalenú oceľovú guľôčku s priemerom 10 mm, obr. 10.5. Jeden úder kladivom vytvorí dva vtlačky – v meranom materiáli a v skúšobnej tyči. Priemery vtlačkov závisia od tvrdosti materiálov, merajú sa pomocou lupy.



Obr. 10.5 Poldi kladivko (1 – úderník, 2 – referenčná tyč, 3 – meraný materiál)

Tvrdosť meranej vzorky sa dá určiť pomocou priloženej tabuľky (porovnávacia – komparačná metóda), alebo výpočtom podľa nasledujúceho vzťahu:

$$HB = \frac{D - \sqrt{D^2 - d_T^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_M^2}}$$

kde D – priemer guľôčky,

$d_M$  – priemer vtlačku v testovanom materiáli

$d_T$  – priemer vtlačku v referenčnej tyči

### Úlohy:

#### ➤ **Doplňte definíciu. Odpovedajte na otázky.**

Tvrdosť je odolnosť materiálu voči ..... spôsobenej .....

Malý tvrdý geometricky definovaný predmet používaný na vytváranie vtlačkov v tuhých materiáloch sa nazýva .....

Ako sa nazýva prvá stupnica tvrdosti, ktorá sa skladala z 10 minerálov usporiadaných podľa tvrdosti? Tvrdosť materiálu sa získala rýpaním jednotlivými minerálmi. Názov tejto stupnice tvrdosti je .....

Aký tvar indentora sa používa v uvedených skúškach tvrdosti?

Brinellova skúška: .....

Vickersova skúška: .....

Rockwellova skúška: .....

V ktorej skúške tvrdosti je smerodajná veľkosť vtlačku? ..... a .....

V ktorej skúške tvrdosti je smerodajná hĺbka? .....

#### ➤ **Dekódujte výsledky merania tvrdosti získané rôznymi metódami:**

180 HBW 10/30/30

250 HBS 5/30

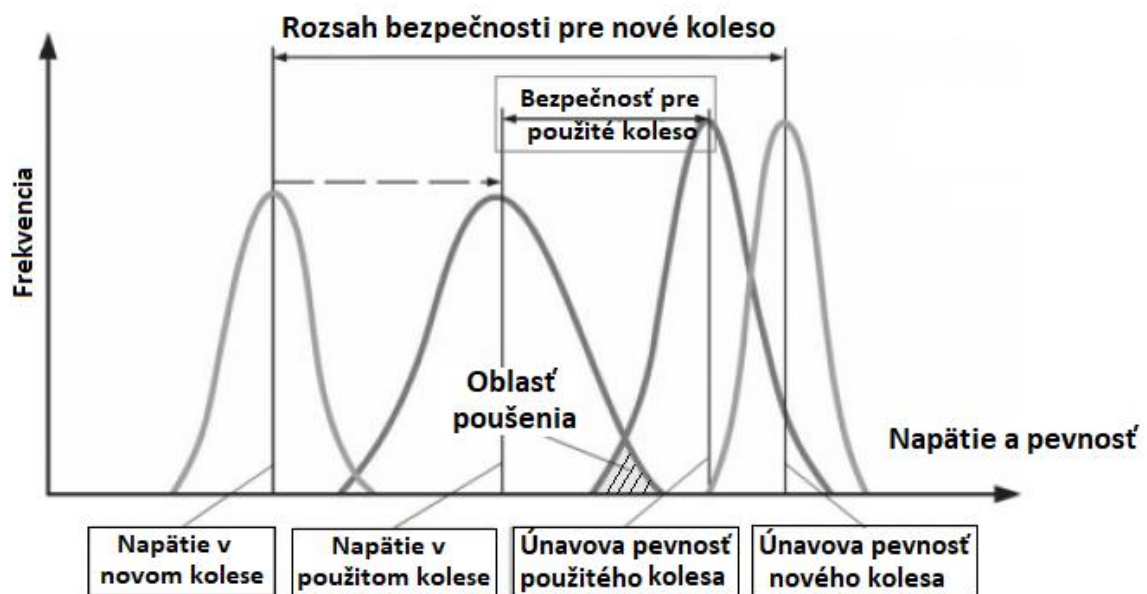
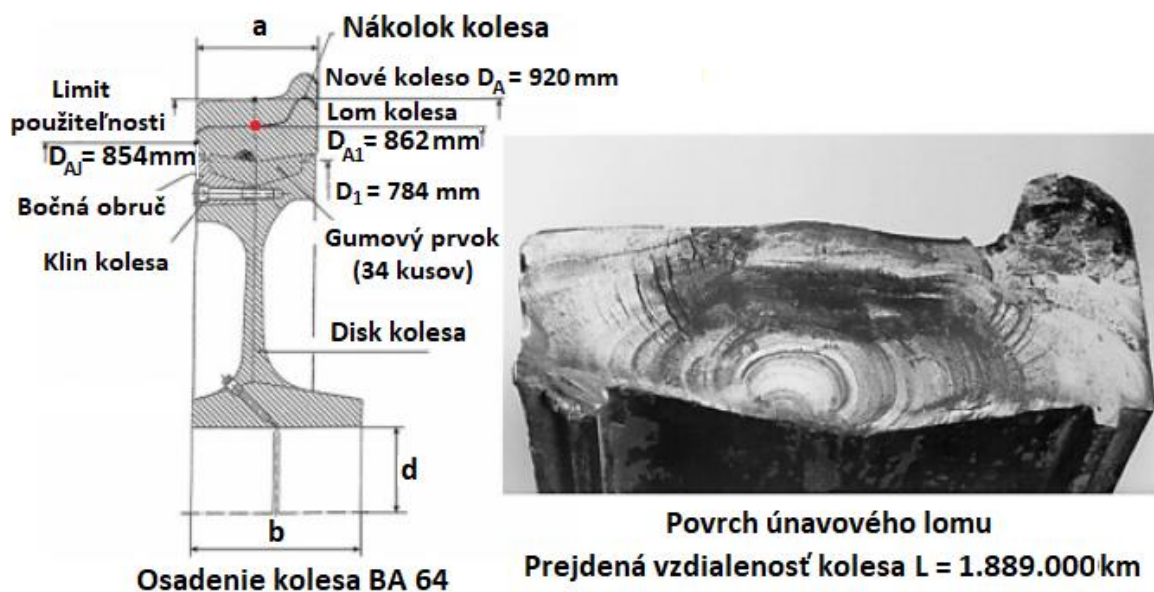
620 HV 30/30

250 HV 0.1

38 HRE

## Téma č. 11: SKÚŠKA ÚNAVY MATERIÁLOV

Únava konštrukčných materiálov je degradačný proces nevratných zmien vlastností a stavu materiálu, vyvolaný jeho opakovaným mechanickým, tepelným alebo tepelno-mechanickým zaťažovaním za súčasného spolupôsobenia ďalších faktorov. Termín „únava“ ako prvý pri opise porušenia konštrukčných materiálov použil v roku 1839 francúzsky matematik, inžinier Jean Victor Poncelet, avšak výskumu v tejto oblasti sa najintenzívnejšie venoval od roku 1852 nemecký železničný inžinier August Wöhler, pri štúdiu príčin vlakových nešťastí a skúmaní príčin porušenia železničných dvojkolesí. Únavový lom kola je dokumentovaný na obr. 11.1.



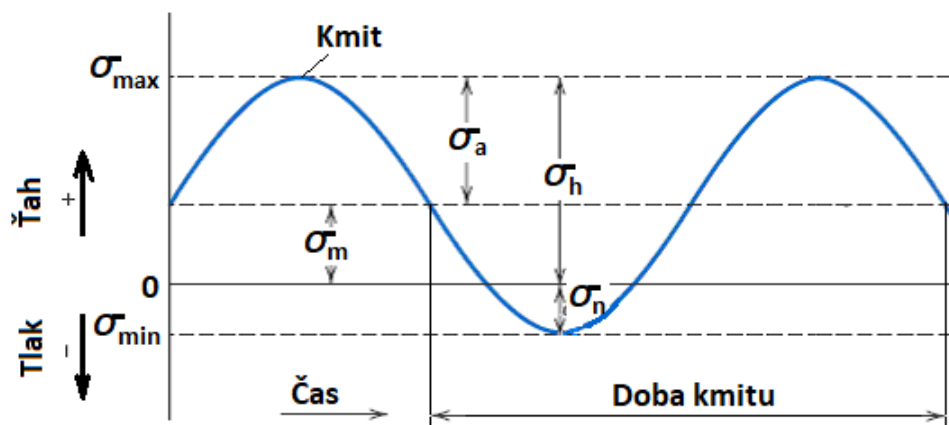
Obr. 11.1 Únavový lom vlakového kola spôsobil - haváriu vlaku ICE 884 „Wilhelm Conrad Röntgen“ pri Eschede cestou z Mníchova do Hamburgu 3.6.1998

Únava materiálu je proces zmien štruktúrneho stavu materiálu a jeho vlastností vyvolaný kmitavým (cyklickým) zaťažovaním (obr. 11.2), pričom najvyššie napätie je menšie ako medza pevnosti  $R_m$  a vo väčšine prípadov tiež menšie ako medza skľuzu  $R_e$ . Jeho dôsledkom dochádza v materiály k hromadeniu poškodenia, ktoré sa v závere prejaví vznikom a rastom makroskopickej trhliny, ktorá iniciuje únavový lom.

| Kmitavé (cyklické) napätie |                           |                           |                |                           |                           |                           |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| pulzujúce                  |                           | striedavé                 |                |                           | pulzujúce                 |                           |
| záporné pulzujúce          | záporné miznúce           | záporné nesúmerné         | súmerné        | kladné nesúmerné          | kladné miznúce            | kladné pulzujúce          |
|                            |                           |                           |                |                           |                           |                           |
| $1 < R < \infty$           | $R = \infty$              | $-\infty < R < -1$        | $R = -1$       | $-1 < R < 0$              | $R = 0$                   | $0 < R < 1$               |
| $ \sigma_m  >  \sigma_a $  | $ \sigma_m  =  \sigma_a $ | $ \sigma_m  <  \sigma_a $ | $\sigma_m = 0$ | $ \sigma_m  <  \sigma_a $ | $ \sigma_m  =  \sigma_a $ | $ \sigma_m  >  \sigma_a $ |

Obr. 11.2 Základné druhy cyklického namáhania

Cyklické zaťaženie sa periodicky mení od hornej hodnoty po dolnú hodnotu (Obr. 11.3).



Obr. 11.3 Schéma pravidelného striedavého kmitavého namáhania

Doba kmitu je najmenší časový úsek, počas ktorého sa opakuje rovnaký priebeh napätosti.

Zaťažovací cyklus je priebeh napätia za jednu dobu kmitu. Každý pravidelný zaťažovací cyklus je definovaný týmito napätiami:

$\sigma_h$  - horné napätie je algebricky maximálna hodnota cyklického napätia.

$\sigma_n$  - dolné napätie je algebricky minimálna hodnota cyklického napätia.

$\sigma_m$  - stredné napätie je algebricky stredná hodnota horného a dolného napätia vyjadrená rovnicou (11.1).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_n}{2} \quad (11.1)$$

Amplitúda (výkmit) napätia  $\sigma_a$  je najväčšia hodnota premenlivej zložky kmitavého napätia sa rovná polovici algebrického rozdielu horného a dolného napätia kmitu podľa rovnice (11.2).

$$\sigma_a = \pm \frac{\sigma_h - \sigma_n}{2} \quad (11.2)$$

Na únavu materiálu má, okrem amplitúdy zaťažovacieho cyklu, vplyv aj:

- stredná hodnota zaťažovacieho cyklu,
- história zaťažovania a interakcia zaťažovacích hladín pri zaťažovaní s nekonštantnou amplitúdou zaťažovania,
- frekvencia zaťažovania (pri niektorých materiáloch),
- koncentrácia napätia v kritickom mieste,
- gradient napätia v kritickom mieste,
- viacosovosť stavu napätosti,
- stav povrchovej vrstvy materiálu,
- veľkosť konštrukčného prvku,
- teplota,
- vlhkosť, korozívnosť, chemické zloženie atmosféry a iné faktory prostredia,
- interakcia s inými degradačnými mechanizmami creep, fretting, korózia a pod.

Súčiniteľ nesúmernosti cyklu  $R$  je pomer hodnôt dolného a horného napätia kmitu definovaný rovnicou (11.3).

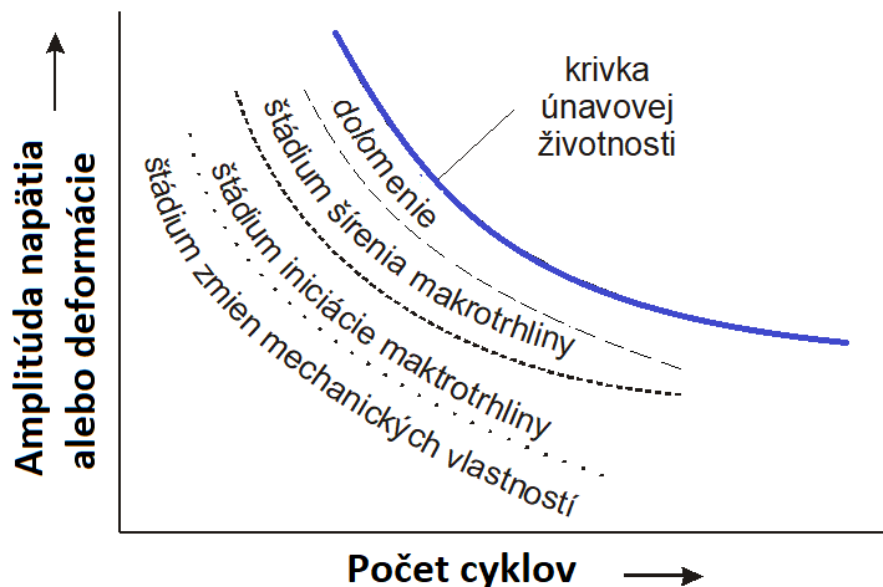
$$R = \frac{\sigma_n}{\sigma_h} = \frac{2 \cdot \sigma_m}{\sigma_h} - 1 \quad (11.3)$$

Podľa veľkosti a znamienka stredného napätia  $\sigma_m$  a súčiniteľa nesúmernosti cyklu  $R$  je možné cyklické zaťaženie rozdeliť na:

- pulzujúce záporne napätie,
- striedavé napätie,
- pulzujúce kladné napätie.

Medza únavy je najvyššia amplitúda napätia pri určitom strednom napätí ( $\sigma_m$ ), ktoré materiál teoreticky vydrží pri nekonečný počet cyklov.

Únavový proces prebieha v štyroch na seba nadväzujúcich štádiách (obr. 11.4):



Obr. 11.4 Štádia únavového procesu

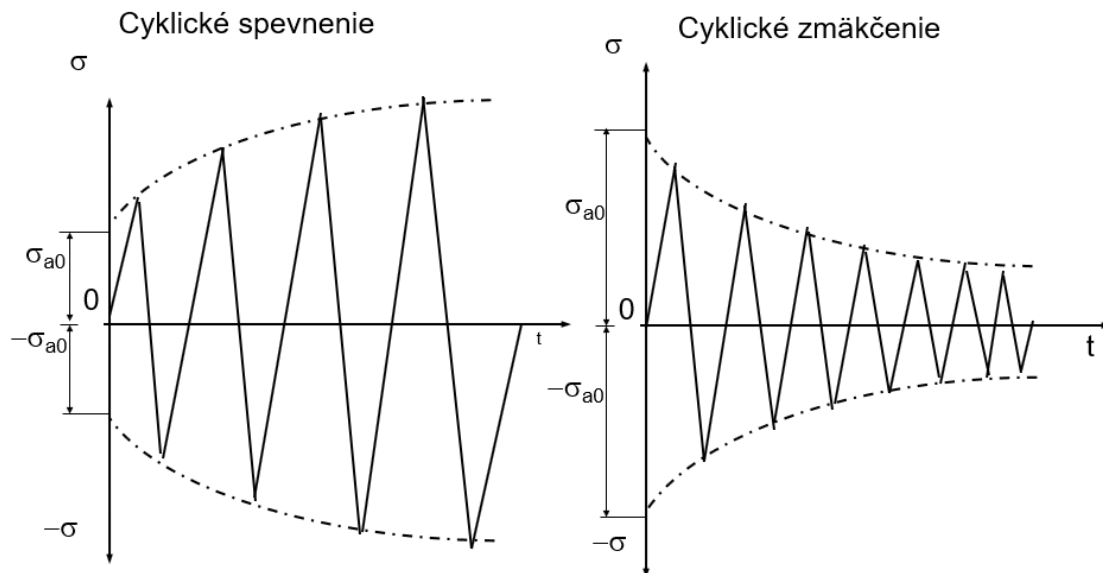
**1. štádium – zmeny mechanických vlastností** v celom objeme zaťažovaného kovu, najmä množstvo a konfigurácia mriežkových porúch, čo spôsobuje zmenu mechanických a fyzikálnych vlastností (Obr. 11.5). Dochádza k: **cyklickému speneniu** u materiálov s pomerom  $R_m/R_e > 1,4$  a **cyklickému zmäkčeniu** u vytvrdených materiálov s pomerom  $R_m/R_e < 1,2$ .

**2. štádium – nukleácia (vznik) trhlín** najmä v miestach koncentrácie napätia a cyklickej plastickej deformácie. Pri cyklickom zaťažení dochádza k šíreniu novovzniknutých trhlín.

**3. štádium – šírenie magistrálnej (únavovej) trhliny** iniciované trhlinami z prechádzajúceho štádia. Ich šírenie podporuje vysoká koncentrácia cyklickej plastickej deformácie. Hornú

hranicu predstavuje krivka únavy, ktorá je krivkou životnosti časovej únavy. Magistralná trhlinka je iniciátorom únavového lomu.

**4. štádium – konečného lomu (tzv. dolomenie)** je výsledkom šírenia únavovej trhliny a zoslabenie nosného prierezu súčasti. Ak dosiahne trhlinka kritickú veľkosť, dôjde k náhlemu lomu zvyšného prierezu. Na lomovej ploche je viditeľné východisko lomu (ohnisko) a rastové čiary (striacie).



Obr. 11.5 Schéma cyklického spevnenia a zmäkčenia

Podľa rozsahu a miery plastickej deformácie únavu rozlišujeme na:

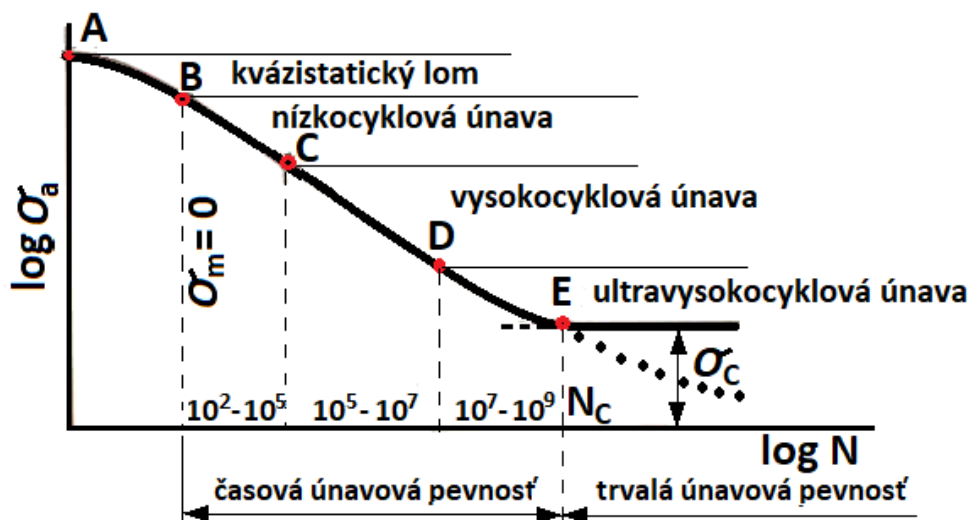
**Nízkokyklusová (vysokodeformačná) únava** s počtom zaťažovacích cyklov  $10^2 \leq N_f \leq 10^5$  zaťažovacích cyklov, pri ktorej prebieha cyklická plastická deformácia v makroobjeme, prípadne v celom objeme telesa.

**Vysokokyklusová únava** s počtom cyklov  $10^5 \leq N_f \leq 10^7$  kde je teleso v makroelastickom stave (pod medzou klzu). Únavová porucha vzniká v mieste lokálnej plastickej deformácie. S rastúcim rozsahom plastickej deformácie klesá životnosť  $N_f$ .

**Ultravysokokyklusová (gigacyklusová) únava**  $10^7 \leq N_f < 10^{10}$  podľa výskumných prác Nishijimu, Kanazawu a Murakamiho môže byť deštrukcia iniciovaná ako z povrchu, tak aj pod povrchom. Pod povrchom môže byť iniciátorom porušenia heterogenita resp. vnútorné pory v materiály a tiež vodíková krehkosť.

Pod pojmom životnosť sa rozumie počet cyklov do lomu  $N_f$ .

Riadiacim faktorom procesu únavy je amplitúda (rozkmit) plastickej deformácie a reakcia materiálu na opakované zaťažovanie charakterizuje prevádzková krivka napätie – deformácia. Závislosť počtu cyklov na pôsobiacom napätí je možné vyjadriť pomocou únavovej krivky tzv. **Wöhlerovej krivky** (obr. 11.6). Charakterizuje oblasť nízkokycklovej, vysokocycklovej aj ultravysokocycklovej únavy.



Obr. 11.6 Wöhlerová krivka pri striedavom symetrickom cykle (stredné napätie  $\sigma_m = 0$ )

**Wöhlerové krivky sa zvyčajne členia na tieto oblasti:**

**Oblasť kvázistatického lomu:** k lomu dochádza už po niekoľkých desiatkach cyklov,

**Oblasť nízkokycklovej únavy:** je charakterizovaná napätiami vyššími ako medza klzu  $R_e$ ,

**Oblasť vysokocycklovej únavy:** je charakterizovaná napätiami nižšími ako medza klzu  $R_e$ .

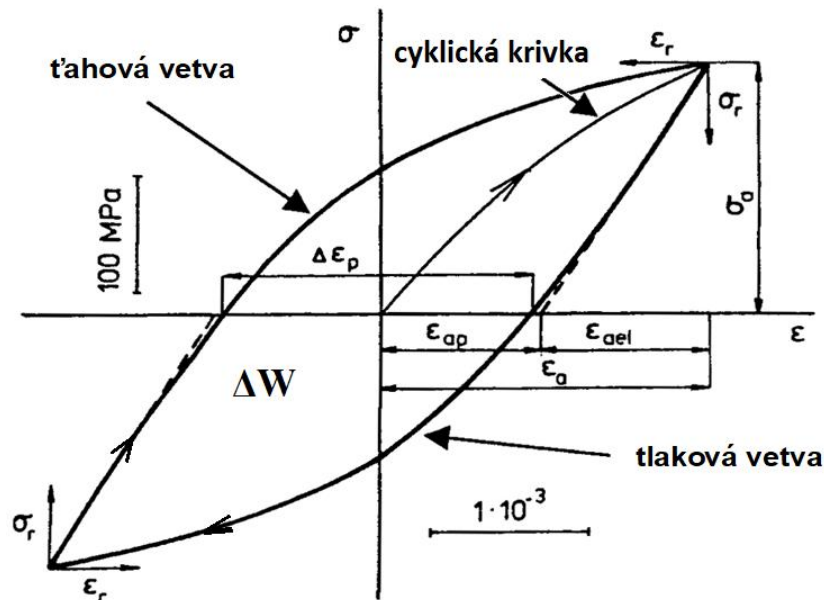
**Oblasť ultravysokocycklovej únavy:** je podobne ako vysokocycklová únav charakterizovaná napätiami nižšími ako medza klzu  $R_e$ .

### Nízkokycklová únav

Tento typ porušenia je charakteristický pre vysoko namáhané súčiastky vystavené vysokým amplitúdam zaťažovania. Vzniká v miestach koncentrácie napätí, cyklická plastická deformácia prebieha v makroobjeme, alebo v celom priereze telesa. Kmitavé zaťažovanie v oblasti plastických deformácií vyvoláva merateľné makroskopické deformácie celého telesa. Tieto nezvratné zmeny v mikroštruktúre materiálov sú príčinou zmien objemových vlastností. Tieto zmeny sú najintenzívnejšie na počiatku kmitania a po určitom počte kmitov (cyklov) nastáva tzv. nasýtenie.

Závislosť medzi napätím a deformáciou pri skúške ťahom sa zobrazuje pomocou ťahového diagramu. Závislosť medzi cyklickým napätím a cyklickou deformáciou sa zobrazuje **hysteréznymi slučkami**. Táto závislosť v ideálnej pružnej oblasti namáhania predstavuje

priamku, ktorá je pri striedavo súmernom cykle symetrická so začiatkom súradníc a má smernicu  $tg\varphi = \varepsilon$ . V skutočnosti zaťažovací a odľahčovací úsek cyklu neprebieha po tej istej čiare, ale v dôsledku vzniku mikroplastických deformácií a ostatných nevratných procesov, ktoré zahŕňame do javu anelasticity, sa vytvára hysterézná slučka. Plocha  $\Delta W$ , ktorú uzatvára hysterézná slučka, je úmerná veľkosti nevratnej energie, pohltenej materiálom v jednom zaťažovacom cykle (Obr. 11.7).



Obr.11.7 Schéma všeobecného tvaru hysteréznej slučky

Celkovú amplitúdu deformácie  $\varepsilon_a$  môžeme rozdeliť na amplitúdu elastickej deformácie  $\varepsilon_{ael}$  a amplitúdu plastickej deformácie  $\varepsilon_{ap}$ . Plochu hysteréznej slučky  $\Delta W$  je možné určiť z rovnice (11.4).

$$\Delta W = k \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_{ap} \quad (11.4)$$

kde faktor  $k$  závisí od aproximácie tvaru hysteréznej slučky. Pre eliptický tvar je  $k = 1,57$ .

Vzhľadom na povahy prevádzkového zaťažovania a aj možnosti skúšania, existujú dva základné typy zaťažovania, definované konštantnou amplitúdou danej veličiny.

-  $\sigma_a = \text{konšt.}$  (mäkký cyklus, mení sa veľkosť deformácie materiálu)

-  $\varepsilon_a = \text{konšt.}$  (tvrdý cyklus, mení sa veľkosť deformácie materiálu)

Po dosiahnutí saturovaného (nasýteného) stavu sa hysterézná slučka nemení stáva sa uzatvorenou. Každá ustálená hysterézná slučka je charakterizovaná dvojitou amplitúdou  $\sigma_a$

-  $\varepsilon_{ap}$ . Vrcholy ustálených hysteréznych slučiek definujú cyklickú deformačnú krivku.

Životnosť pri nízkokyčkovej únave je možné sledovať na skúšobných vzorkách pri konštantnej deformácii (tvrdý cyklus). Vznikom trhliny dochádza k strate tuhosti telesa a k poklesu napätia.

Zákonitosti porušovania v oblasti nízkokyčkovej únavy vyjadruje Manson - Coffinov –zákon definovaný vzťahom (11.5).

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = C_1 N_f^b + C_2 N_f^c = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f (2N_f)^c \quad (11.5)$$

kde:  $\sigma_f$  – súčiniteľ únavovej pevnosti (statickej pevnosti),

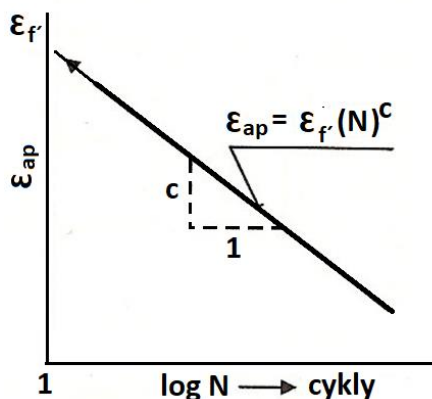
$b$  – exponent únavovej pevnosti (-0,09),

$\varepsilon_f$  – súčiniteľ únavovej ťažnosti (statickej ťažnosti),

$c$  – exponent únavovej ťažnosti (-0,6),

$C_1, C_2$  – konštanty, parametre rovnice.

Manson - Coffinová krivka životnosti je dokumentovaná na obr. 11.8.



Obr. 11.8 Manson - Coffinova krivka

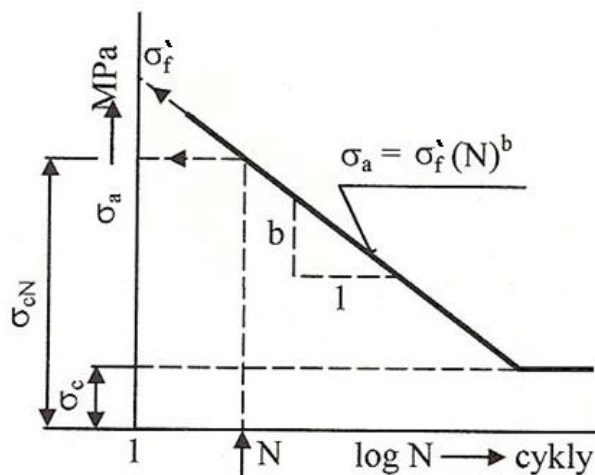
$c$  - exponent krivky životnosti,  $\varepsilon_f$  - súčiniteľ únavovej ťažnosti,

$\varepsilon_{ap}$  - amplitúda plastickej deformácie,  $N$  - počet cyklov

### Vysokocyklová únava

Vysokocyklová únava je charakteristická pre súčiastky vystavené vysokému počtu záťažových cyklov pri relatívne nižších amplitúdach zaťažovania a takmer nemerateľnými amplitúdami plastickej deformácie. Vysokocyklovú únavu je možné prezentovať pomocou Wöhlerovej krivky (Obr. 11.9). Jedná sa o krivku životnosti pri symetrickom cykle zaťažovania. Na zvislú os sa nanáša amplitúda napätia a na vodorovnú počet cyklov do lomu.

Wöhlerovú krivku, ktorá vyjadruje závislosť amplitúdy napätia od počtu polcyklov do lomu je možné pre väčšinu konštrukčných materiálov aproximovať mocninovou funkciou (Basquinovou závislosťou) podľa rovnice (11.6).



Obr. 11.9 Wöhlerová krivka

$b$  - exponent krivky životnosti,  $\sigma_f'$  - súčiniteľ únavovej pevnosti,  $\sigma_a$  - amplitúda napätia,  $N$  - počet cyklov,  $\sigma_c$  - medza únavy,  $\sigma_{cN}$  - časová medza únavy - najväčší výkmit napätia pri určitom strednom napätí  $\sigma_m$ , ktoré materiál vydrží vopred predpísaný počet cyklov.

$$\sigma_a = \sigma_f' \cdot (2N)^b \quad (11.6)$$

kde:  $\sigma_f'$  - je súčiniteľ únavovej pevnosti,  $N$  - počet cyklov,  $b$  - exponent únavovej pevnosti.

Pri nízkocyklovej a vysokocyklovej únave **sa únavové trhliny iniciujú na povrchu**.

### Ultravysokocyklová (gigacyklová) únava

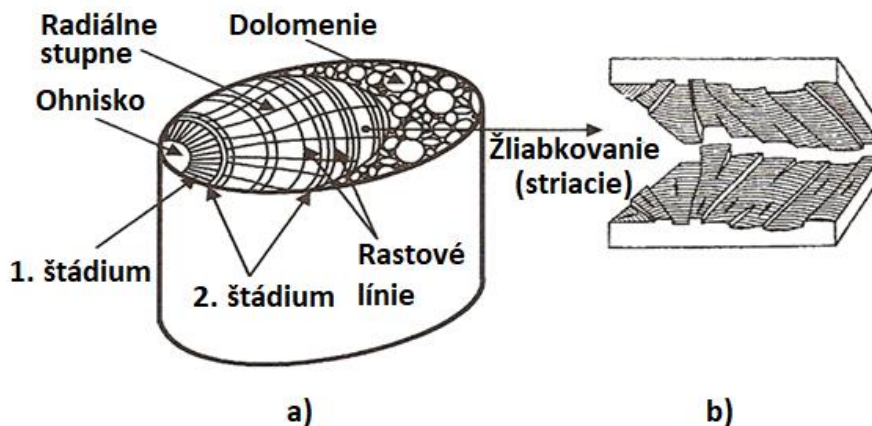
Pri gigacyklovej únave sú amplitúdy plastickej deformácie veľmi malé a únavové trhliny sa iniciujú (aj) vo vnútri materiálu. Pre ocele sa medza únavy určuje na základe skúšok s počtom cyklov zaťaženia  $10^7$ . Z praktického hľadiska sa určuje aj pre materiály (napr. hliník), ktorých krivky životnosti klesajú súvisle. U Hliníka a jeho zliatin sa medza únavy určuje na základe  $10^8$  zaťažovacích cyklov.

### Únavový lom

Vznikne vtedy, ak je prekročená medza únavy materiálu. V mieste povrchu, kde dochádza ku koncentrácii napätia, spravidla ťahového, vznikne po určitom počte cyklov zárodok trhliny. Pokračujúcim premenlivým zaťažením sa striedavo "otvára" a "zatvára" a šíri sa do hĺbky materiálu. Týmto otváraním a zatváraním sa povrchy vyhladia až vyleštia, dostávajú typický lastúrovito vyhladený vzhľad. Ak sa táto únavová oblasť vznikajúceho lomu rozširuje, znižuje sa nosný prierez súčasti až napätia vyvolané okamžitým zaťažením prekročia medzu pevnosti a súčiastka sa v zostávajúcom priereze zlomí statickým lomom.

Únavový lom patrí medzi bezdeformačné typy lomov. Lomová plocha únavového lomu má dve typické, vzhľadovo odlišné oblasti (obr. 11.10):

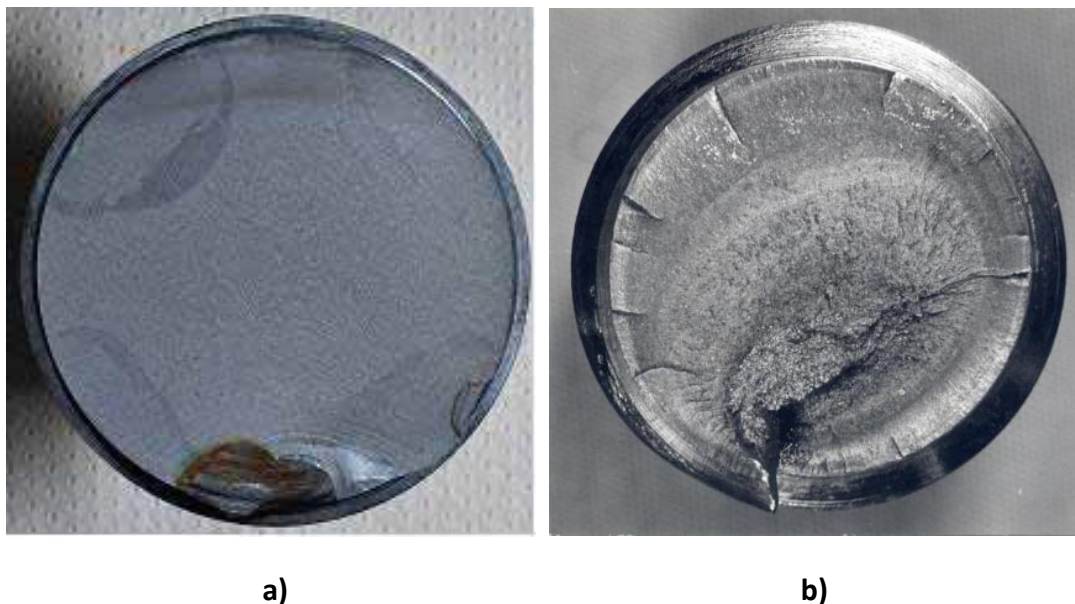
- únavovú, s lastúrovito vyhladeným povrchom
- statickú, s typickým drsným povrchom lomu



Obr. 11.10 Fraktografia povrchu únavového lomu

a) makroskopický pohľad, b) mikroskopický pohľad

Na základe hodnotenia morfológie povrchov únavového lomu (Obr. 11.11) sa analyzujú príčiny jeho vzniku a navrhujú opatrenia ako výskytu týchto porušení predchádzať.



Obr. 11.11 Povrchy únavového lomu hriadeľov

a) povrch únavového lomu hriadeľa z krehkého materiálu, b) povrch únavového lomu hriadeľa z húževnatého materiálu,

Pre prípady namáhania s prevažujúcim ťahom alebo ohybom je typická rovná (rovinná) lomová plocha, kolmá k osi súčasti (Obr. 11.11a). V prípade, že prevažujúcim namáhaním je krut alebo krut s ohybom, vzniká únavový lom úplne analogicky. Lomová plochy však nie je rovinná, ale má tvarovo členitý (zložitý) tvar (Obr. 11.11b).

**Únavová pevnosť** možno zvýšiť:

- zmenšením rozkmitu napätia  $\Delta\sigma$  zväčšením hrúbky materiálu,
- voľbou vhodnejšieho tvaru konštrukčného detailu,
- zmenšením vrubových účinkov zvarových spojov, napr. obrúsením povrchu, alebo pretavením prechodu zvar - základný materiál spôsobom TIG,
- vnesenie povrchových tlakových napätí, guľočkovaním, valčekovaním, trýskaním a chmicko-tepelným spracovaním

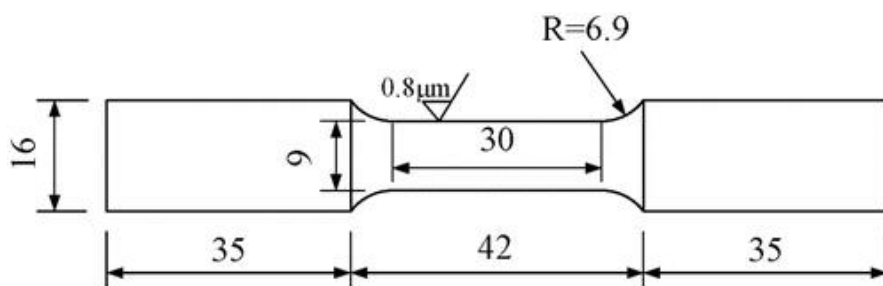
### Skúšky medze únavy

Skúšky medze únavy sa realizujú pri týchto spôsoboch namáhania:

- **v plochom ohybe**, pri ktorom je skúšobná tyč namáhaná cyklicky premenlivým momentom, pôsobiacim v stále rovnakej rovine. Povrchové vrstvy skúšobnej tyče sú pri tom namáhané zaťažením striedavým ťah - tlak, pulzačným, alebo miznúcim.
- **v ohybe za rotácie**, pri ktorom rovina chybového momentu rotuje vzhľadom ku skúšobnej tyči. Povrchové vrstvy tyče sú namáhané napätím striedavým súmerným v ťahu - tlaku.
- **v krútení**, pritom môže byť zaťaženie striedavé, súmerné, pulzačné, alebo miznúce.
- **kombinovaným namáhaním**, napr. ohyb - krútenie a pod.

Prípravu skúšobných vzoriek definujú normy STN EN ISO 377 a STN 42 0306. Laboratórne skúšky únavy sa realizujú minimálne na 6 až 10 hladkých skúšobných vzorkách pre stanovenie jednej krivky únavy s prierezom kruhovým (Obr. 11.12), alebo nekruhovým na plochých skúšobných tyčiach (Obr. 11.13). Vo zvláštnych prípadoch sa používajú skúšobné tyče s konštrukčnými vrubmi. Tvar skúšobnej tyče je určený tvarom skúšobného kusa, spôsobom namáhania a typom skúšobného stroja. Priemer skúšanej časti tyče s kruhovým prierezom je obvykle v rozsahu 5-15 mm. Proces obrábania skúšobných vzoriek je potrebné realizovať s čo najmenším tepelným ovplyvnením postupmi obrábania minimalizujúce vnesenie vnútorných napätí do materiálu. Dokončovacími operáciami trieskového opracovania sú brúsenie a leštenie povrchov na drsnosť povrchu  $R_a = 0,1 - 0,2 \mu m$ .

Pre skúšanie únavy sa používajú programovateľné stroje, ktoré v skúšobnej tyči vyvodzujú periodicky premenlivé napätie s približne sinusoidálnym priebehom.

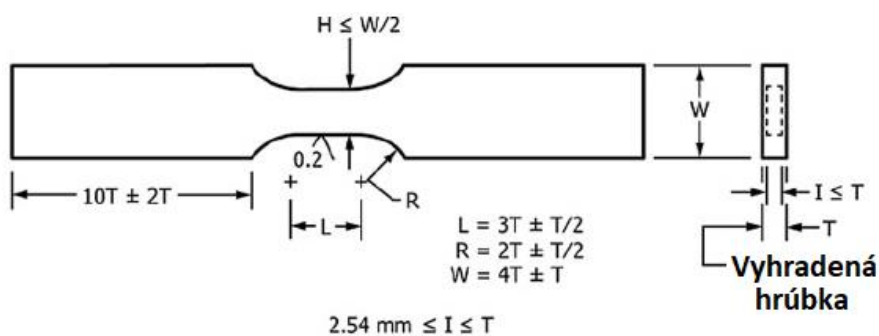


(a)



(b)

Obr. 11.12 Rotačná vzorka pre skúšku únavy



(a)



(b)

Obr. 11.13 Plochá vzorka pre skúšku únavy

**Úlohy:**

- Zostrojte Wöhlerovú krivku pre daný typ ocele
- Z priebehu únavovej krivky určte časovú medzu únavy pre počet cyklov  $3 \cdot 10^5$
- Určte medzu únavy pre trvalú únavovú pevnosť

## Téma č. 12: TECHNOLOGICKÉ SKÚŠKY MATERIÁLOV

Pod pojmom technologické vlastnosti rozumieme súbor fyzikálnych a mechanických vlastností materiálu, ktoré umožňujú pri definovaných podmienkach určitý spôsob spracovania materiálu na polotovary resp. hotové výrobky. Charakterizujú vhodnosť daného materiálu pre danú technológiu spracovania. Medzi základné technologické vlastnosti patrí tvárnosť, zlievateľnosť, obrobiteľnosť, zvariteľnosť, spájkovateľnosť a lepiťnosť. Technologické vlastnosti nie je možné vyjadriť presne definovanými veličinami, ktoré by mali fyzikálny význam. Vykonávajú sa pri podmienkach napodobňujúcich výrobné procesy resp. priamo na výrobných strojoch. Zisťujú sa len zrovnateľné ukazovatele, ktoré umožňujú kvalitatívne posúdenie vhodnosti materiálu pre daný spôsob spracovania.

V technickej praxi sa používajú normalizované, ale tiež aj nenormalizované technologické skúšky. Skúšobné prístroje majú spravidla jednoduchý princíp a konštrukciu. Medzi nepoužívané technologické skúšky patria:

### 1. Skúška lámavosti – STN EN ISO 7438

Cieľom skúšky je zistiť schopnosť kovových materiálov plasticky sa deformovať pri namáhaní statickým ohybom. Skúšobná tyč obdĺžnikového, kruhového, štvorcového alebo mnohoúhelníkového prierezu sa podrobí plastickej deformácii ohybom až do predpísaného uhla. Pri šírke polotovarov a výrobkov do 20 mm sa používajú tyče rovnakej šírky. Pri väčších šírkach: do hrúbky výrobku  $a < 3 \text{ mm}$  sa odoberú tyče o šírke  $b = 20 \text{ mm}$ ; pri hrúbke výrobku  $a \geq 3 \text{ mm}$ , šírka tyče je od 20 do 50 mm. Hrúbka skúšobného telesa z plechov a pásov a tvarových prierezov musí mať hrúbku skúšobného výrobku. Ak hrúbka výrobku je väčšia ako 25 mm, môže sa zmenšiť opracovaním jednej strany povrchu najmenej na 25 mm. Neopracovaná plocha pri ohybe je na ťahanej strane. Všetky oblasti materiálu ovplyvnené strihaním alebo rezaním plameňom sa musia odstrániť. Hrany pravouhlých tyčí na strane ťahaných vlákien sa musia zaobliť. Dĺžka skúšobného telesa sa určuje podľa jeho hrúbky a použitého skúšobného zariadenia.

Skúška lámavosti sa robí na skúšobnom stroji alebo lise, ktoré sú vybavené:

- ohýbacím zariadením s dvoma podperami a trňom podľa obrázku 12.1. Vzdialenosť podpier a šírka trňa musia byť väčšie ako je šírka alebo priemer skúšobného telesa. Priemer trňa a uhol ohybu stanovujú normy na výrobky. Vzdialenosť medzi podperami  $l$ :

$$l = (D + 3a) + a / 2 \quad [\text{mm}] \quad (12.1),$$

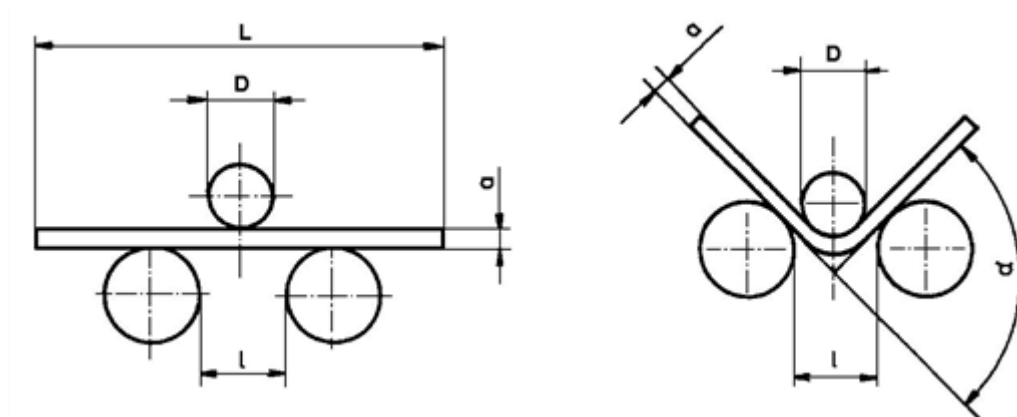
- ohýbacím zariadením s blokom V s trňom podľa obrázku 12.2,
- ohýbacím zariadením s upínacími čeľustami podľa obrázku 12.3.

Skúška lámavosti sa vykonáva pri teplote okolia (10 až 35°C) jednou z nasledujúcich metód:

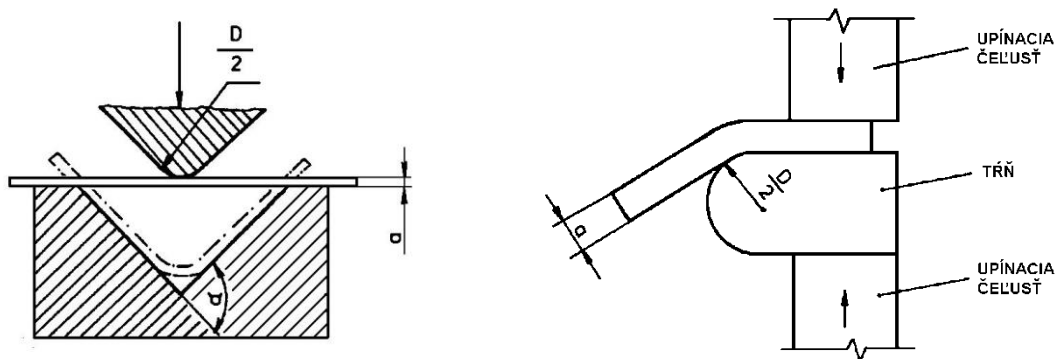
ohybom do predpísaného uhla pod zaťažením (pozri obrázky 12.1, 12.2 a 12.3),

ohybom do rovnobežnej polohy ramien pri ich stanovenej vzdialenosti pod zaťažením, s použitím vložky alebo bez vložky – obr. 12.4a,

ohybom do dosiahnutia ramien na seba pod zaťažením – obr. 12.4b.



Obr. 12.1 Skúška lámavosti trojbodovým ohybom

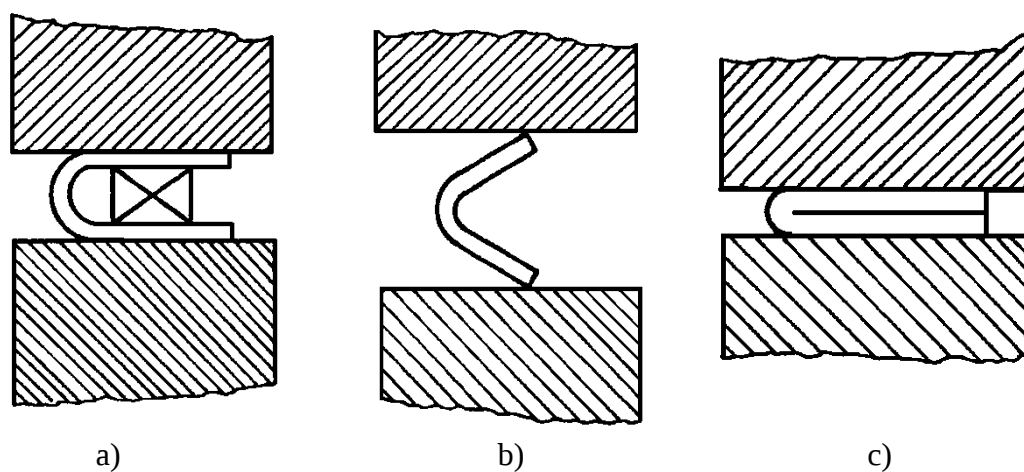


Obr. 12.2 Skúška lámavosti s blokmi V    Obr. 12.3 Skúška lámavosti s upínacími čelustami

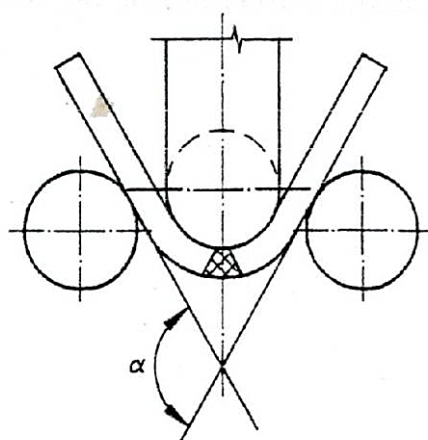
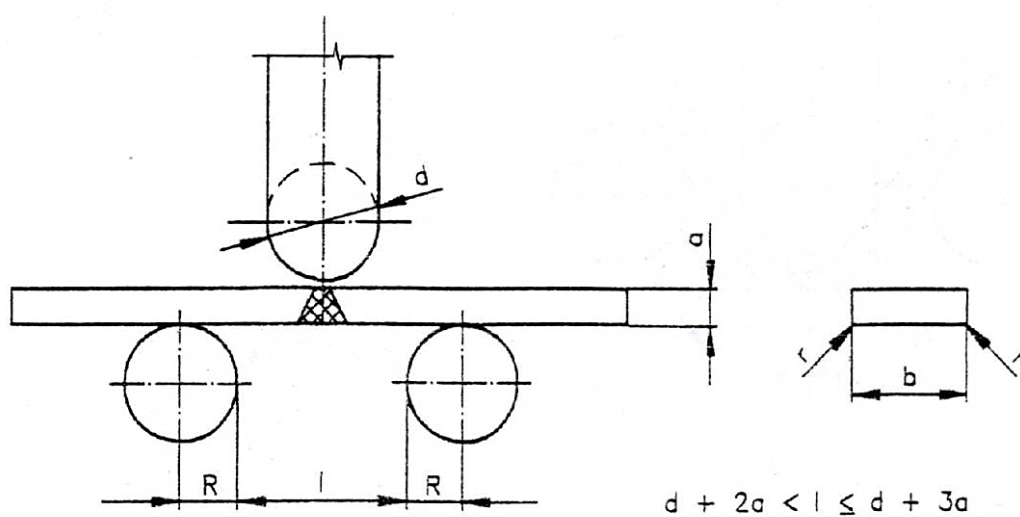
Zaťažovanie v ohybe musí pôsobiť pomaly, aby bol možný voľný plastický tok materiálu. Ohyb do predpísaného uhla sa môže ukončiť pôsobením zaťaženia priamo na voľné konce skúšobného telesa – obr. 12.4.c.

Skúška sa vyhodnotí v súlade s požiadavkami na výrobok. Pokiaľ pri predpísanom uhle nevznikli na ťahanej strane trhliny, skúšobná vzorka vyhovela. Protokol o skúške obsahuje:

- odkaz na normu, - metódu skúšania, - tvar a rozmery skúšobnej tyče, - údaje pre identifikáciu tyče (materiál, číslo tavby, smer osi telesa k výrobku), - výsledok skúšky.



Obr. 12.4 Metódy skúšok lámavosti



Obr. 12.5 Skúška lámavosti tyčí s priečnym zvarom z líčnej alebo koreňovej strany pomocou trňa

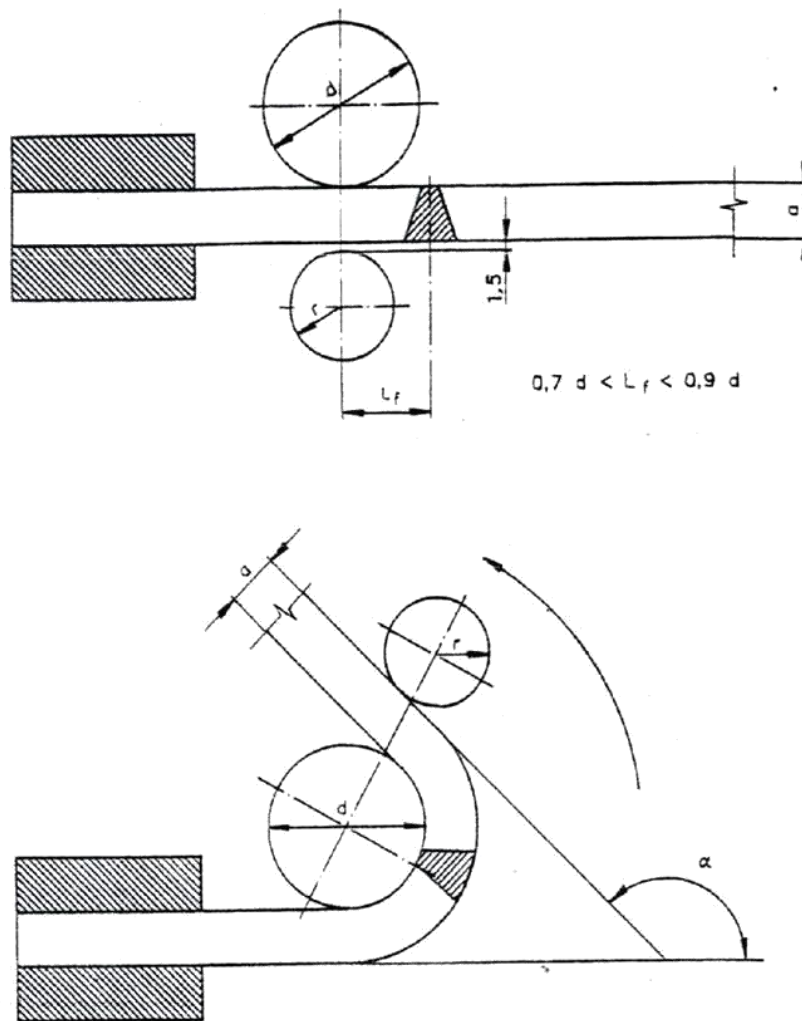
Skúška lámavosti sa tiež využíva aj pri hodnotení zvarových spojov. Technické podmienky a rozmerové kritériá stanovuje STN EN ISO 5173. Cieľom skúšky je zistiť deformačnú schopnosť kovu namáhaného statickým ohybom pri izbovej teplote (20°C). Lámavosť sa posudzuje podľa veľkosti uhla ohybu  $\alpha$ , ktorý skúšobná tyč znesie bez porušenia. Vzhľadom na skúšobnú teplotu sa takto zistená vlastnosť posudzuje ako lámavosť za studena. Skúška sa robí na trhacích strojoch alebo na lisoch. Skúšobná tyč odobratá v priečnom alebo v pozdĺžnom smere zo zvarového spoja sa podrobuje plastickej deformácii ohybom, bez zmeny smeru ohýbania takým spôsobom, aby jeden z povrchov alebo prierezov zvarového spoja bol namáhaný ťahom. Na skúšku lámavosti tyčí s priečnym zvarom sa skúšobná tyč odoberie priečne zo zvarového spoja zhotoveného výrobku alebo zo zvarenej skúšobnej vzorky takým spôsobom, aby po opracovaní zostala os zvaru v strede skúšobnej tyče alebo v polohe vhodnej na skúšanie. Na skúšku lámavosti tyčí s pozdĺžnym tupým zvarom sa skúšobná tyč odoberie pozdĺžne zo zvarového spoja alebo zhotoveného výrobku, alebo zo zvarenej skúšobnej vzorky. Pred začatím skúšky lámavosti sa môžu tvar a poloha oblasti natavenia alebo hranice stavenia určiť miernym makronaleptaním povrchu skúšobnej tyče, ktorý bude namáhaný ťahom. Skúšobná tyč má šírku 20 až 40 mm od osi zvaru na ťahanej strane skúšobnej vzorky zaoblené hrany s polomere do 0,1 mm z dôvodu minimalizácie iniciovania trhliny ostrou hranou v mieste pôsobenia ohýbacieho trňa.

#### **Skúšanie pomocou trňa (obr. 12.5)**

Skúška sa vykoná umiestnením skúšobnej tyče na dva podstavce pozostávajúce z paralelných valčekov, zvar musí byť v strede vzdialenosti valčekov s výnimkou pozdĺžnych skúšok lámavosti. Vzdialenosť medzi valčkami musí byť medzi  $d + 2a$  a  $d + 3a$ . Skúšobná tyč sa ohýba postupným a nepretržitým zaťažením v strede rozpätia pôsobením trňa v osi zvaru kolmo na povrch skúšobnej tyče (trojbodový ohyb).

#### **Skúšanie pomocou valčeka (obr. 12.6)**

Skúška lámavosti riadeným ohybom pomocou valčeka je alternatívnou metódou skúšania, ktorú možno použiť na hliníkové zliatiny a spoje v iných materiáloch, kde zvarový kov alebo jeden zo spájaných materiálov má nižšiu medzu klzu alebo ťažnosť ako základný materiál.



Obr. 12.6 Skúška lámavosti tyčí s priečnym zvarom z lícnej alebo koreňovej strany pomocou valčeka

Skúška sa uskutoční pevným upnutím jedného konca skúšobnej tyče v skúšobnom prístroji s valčekom paralelným s trňom. Skúšobná tyč sa ohýba zaťažením postupne a nepretržite rotáciou vonkajšieho valčeka po oblúku, ktorého stred je v osi trňa.

Priemer  $d$  trňa musí zodpovedať požiadavkám príslušnej normy na výrobok. Priemer valčeka musí byť najmenej  $20 \text{ mm}$ , ak nie je určené inak v príslušnej norme na výrobok. Skúška je skončená, keď uhol ohybu  $\alpha$  (obr. 12.5 a obr. 12.6) dosiahne hodnotu uvedenú v príslušnej norme na výrobok.

Keď sa požaduje predĺženie, musia mať tyče z ocelí na skúšku lámavosti z koreňovej alebo lícnej strany meranú dĺžku:

- pre tavné zvary:  $L_0 = L_s$  alebo  $2L_s$  alebo  $L_s + a$
- pre tlakové zvary, elektrónové zvary a laserové zvary:  $L_0 = a$  alebo  $2a$ .

Pri ohýbaní sa skontroluje vonkajší povrch a strany skúšobnej tyče. Ak nie je určené inak, chyby kratšie ako 3 mm na hranách skúšobnej tyče nie sú dôvodom nevyhodenia skúšky.

Umiestnenie skúšobnej vzorky pre skúšku lá mavosti je dokumentované na obr. 12.7. Skúšobná vzorka po deštrukcii na obr. 12.8.



Obr. 12.7 Skúšobná vzorka tupého zvaru  
pred skúškou ohybom



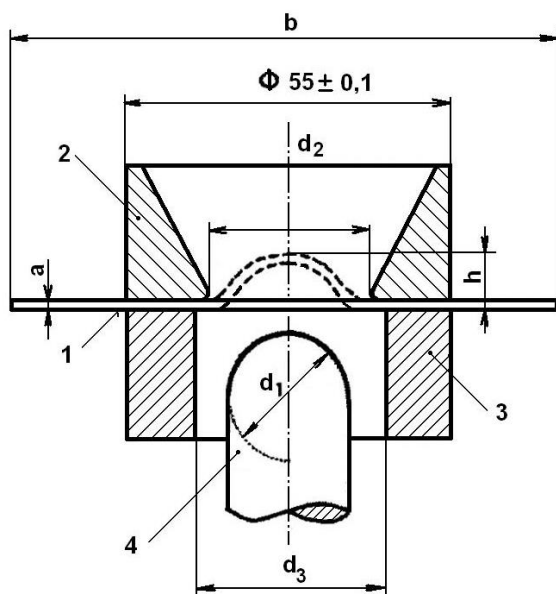
Obr. 12.8 Skúšobná vzorka po ohnutí

### **Technologické skúšky tenkých plechov a pásov**

Vykonávajú sa u tenkých plechov do hrúbky 2 mm a používajú sa na zistenie ich tvárniteľnosti – vhodnosti k hlbokému ťahaniu, opätovnému ohýbaniu a pod.

### **2. Skúška hĺbením podľa Erichsena – STN EN ISO 20482**

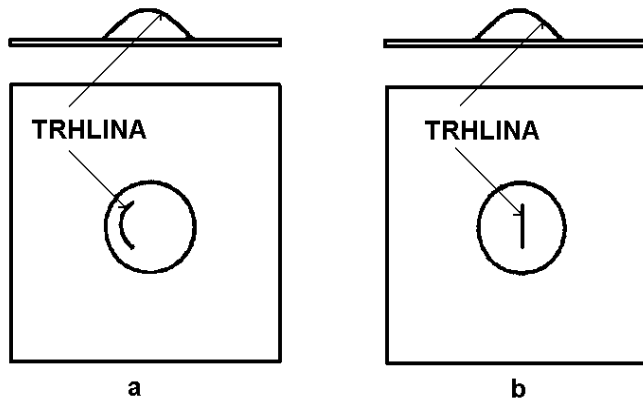
Používa sa na zistenie hlbokoťažnosti plechov a pásov hrúbky 0,1 – 2,0 mm. Pre plechy a pásy so šírkou väčšou ako 90 mm sa používa skúšobná vzorka šírky 90 mm a základný priemer ťažníka  $d_1 = 20$  mm. Pre menšie šírky pásov sa používajú menšie priemery ťažníka a tomu odpovedajúce vnútorné priemery ťažnice  $d_2$  a pridržiavača  $d_3$ . Princíp skúšky spočíva v zatlačení ťažníka 4 s guľovým zakončením (obr. 12.9) do skúšaného plechu 1, ktorý je stlačený medzi ťažnicou 2 a pridržiavačom 3 silou 10 kN.



Obr. 12.9 Princíp skúšky hĺbením podľa Erichsena

Ťažník sa plynulo vtlača do materiálu rýchlosťou  $5 - 30 \text{ mm.min}^{-1}$ . Vtláčanie sa zastaví v okamihu, ak vznikne trhlina po celej hrúbke plechu. Odčíta sa veľkosť prehĺbenia  $h$ , ktorá je charakteristikou materiálu pri Erichsenovej skúške a označuje sa IE. Hodnota prehĺbenia sa odčítava s presnosťou na  $0,1 \text{ mm}$ . Ako doplňujúce kritérium sa môže použiť vzhľad povrchu skúšobnej vzorky v mieste prehĺbenia a tvar trhliny. Pre hlbokoťažné plechy je typický tvar trhliny vo vrstevniciach okrúhleho tvaru - obr.12.10a. Tvar trhliny vychádzajúci zo stredu je typický pre vláknité materiály, nevhodné pre ťahanie - obr.12.10b. Skúška je vyhovujúca, ak prehĺbenie IE je väčšie alebo sa rovná predpísanému prehĺbeniu podľa materiálového listu. Výsledok skúšky

hlbokoťažnosti plechov s laserovým zvarom je dokumentovaný na obr. 12.11.



Obr. 12.10 Tvar trhliny pri skúške hĺbením podľa Erichsena - a) materiál vhodný pre hlboké ťahanie, b) nevhodný pre hlboké ťahanie

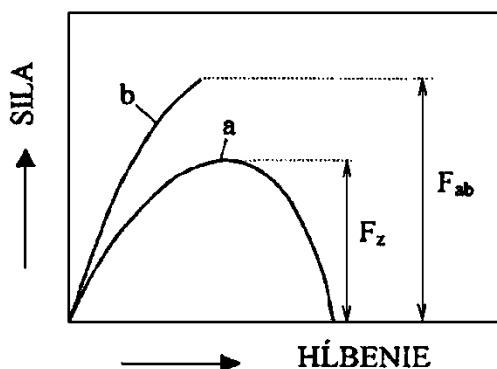
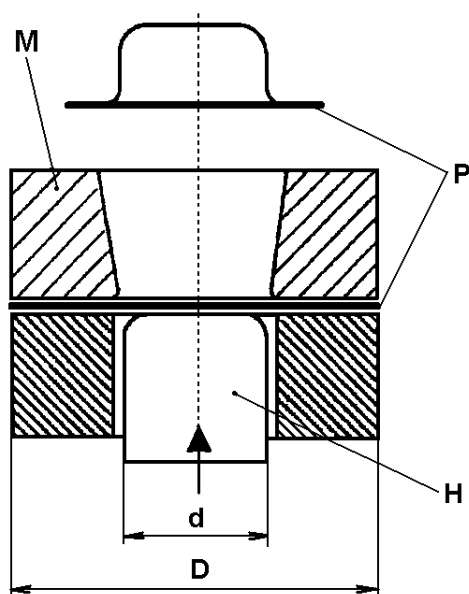


Obr. 12.11 Vzorka laserom zváraných plechov po skúške hĺbeným, nevyhovujúca pre hlboké ťahanie

### 3. Skúška hĺbením podľa Engelhardta

Touto skúškou sa určuje hlbokoťažnosť plechov a pásov do hrúbky  $2 \text{ mm}$ . Skúška spočíva vo vtláčaní skúšaného plechu  $P$  vo forme kotúča s priemerom  $D$  do ťažnice  $M$  pomocou ťažníka  $H$  o priemere  $d$  - obr. 12.12. Pri vtláčaní ťažníka do skúšobnej vzorky rastie sila s hĺbkou výlisku  $h$  podľa obr. 12.13 (krivka a). Po prekročení maximálnej sily (ťažná sila  $F_z$ ) táto

opäť klesá. Pri zväčšovaní pôvodného priemeru vzorky rastie aj veľkosť ťažnej sily  $F_z$ . Po prekročení kritického priemeru vzorky ťažná sila dosiahne takú hodnotu, že sa prekročí medza pevnosti skúšaného materiálu na obvode výlisku a vzorka sa poruší. Priebeh sily v tomto prípade znázorňuje krivka  $b$  na obr. 12.9. Sila, pri ktorej dochádza k porušeniu, tzv. prenosná sila  $F_{ab}$  pri rovnakých podmienkach (priemer výlisku, hrúbka plechu) má pre daný materiál vždy rovnakú hodnotu.



Obr.12. 13 Závislosť sily od hĺbenia výlisku

Obr. 12.12 Princíp skúšky hĺbením podľa Engelhardta

Pre každý plech je teda možné porovnať dve sily, a to silu  $F_z$  na vytvorenie štandardného výlisku a silu potrebnú na porušenie výlisku  $F_{ab}$ . Hlbokotažnosť sa potom vyjadří:

$$T = \frac{F_{ab} - F_z}{F_{ab}} \cdot 100\% \quad (12.2)$$

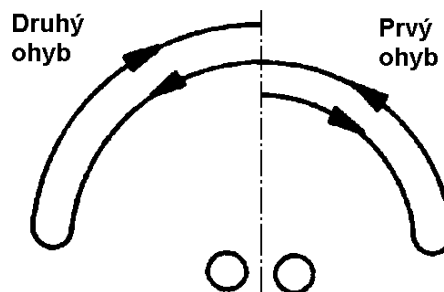
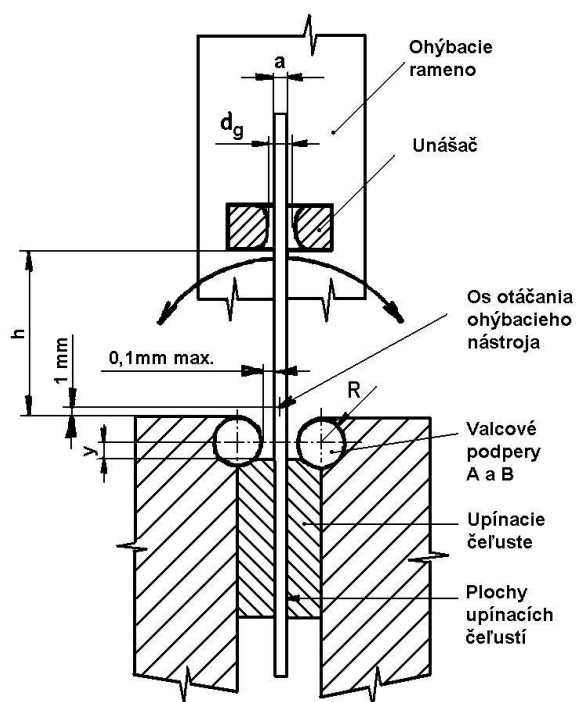
Veľkosť sily  $F_{ab}$  je možné určiť aj použitím jednej vzorky tak, že po určení sily  $F_z$  sa zablokuje okraj výlisku pridržiavačom a pri ďalšom ťahaní sa vzorka poruší.

#### 4. Skúška lámavosti plechov striedavým ohybom – STN EN ISO 7799

Skúška stanovuje schopnosť plechov a pásov s hrúbkou 3 mm a menej, plasticky sa deformovať striedavým ohybom. Podstata skúšky spočíva v opakovanom ohýbaní skúšobnej vzorky z východzej polohy na obe strany o 90°. Skúšobné zariadenie je konštruované podľa obr. 12.14. Polomer valcových podpier  $R$  závisí od hrúbky skúšobného telesa a pohybuje sa v rozmedzí 1-10 mm. Vzdialenosť  $h$  musí byť od 25 do 50 mm. Šírka skúšobného telesa je 20-25 mm. Pásky menšej šírky ako 20 mm môžu byť skúšané v pôvodnej šírke.

Skúšobné teleso sa ohýba striedavo vpravo a vľavo o 90°. Jeden ohyb je definovaný ako ohnutie voľného konca skúšobného telesa o 90° a jeho vrátenie do východzej polohy. Ďalší ohyb sa robí v opačnom smere ako je to uvedené na obr. 12.15. Medzi jednotlivými ohybmi

sa skúška neprerušuje. Rýchlosť ohýbania je rovnomerná a nesmie byť vyššia ako jeden ohyb za sekundu. Skúška je ukončená po dosiahnutí počtu ohybov, stanovených v príslušných normách alebo do objavenia viditeľnej trhliny, prípadne až do úplného lomu.



Obr. 12.15 Postup pri skúške plechov striedavým ohybom

Obr. 12.14 Princíp skúšky lámavosti plechov striedavým ohybom

Skúšobný protokol musí obsahovať tieto údaje:

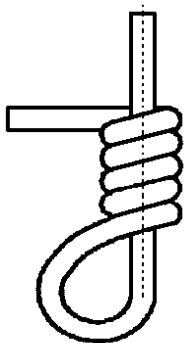
- odkaz na normu,
- údaje pre identifikáciu skúšobného telesa,
- rozmery skúšobného telesa,
- podmienky pri skúške ( $R$ ,  $h$ ),
- spôsob ukončenia skúšky,
- výsledok skúšky.

### Technologické skúšky drôtov

Ich cieľom je odhaliť povrchové a vnútorné chyby drôtov a zistiť tvárnosť a nerovnorodosť materiálu drôtov. Skúšky sú normalizované pre oceľové drôty a drôty z neželezných kovov. Vykonávajú sa pri teplote  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Medzi najdôležitejšie patrí skúška navíjaním krútením a striedavým ohýbaním.

### 5. Skúška drôtov navíjaním – (ISO 7802)

Pri skúške sa drôt s priemerom od  $0,1$  do  $10\text{ mm}$  navíja na valcový trň. Priemer trňa a počet závitov sa určuje príslušnými materiálovými listami. Keď priemer trňa nie je predpísaný, môžeme použiť ako trň skúšaný drôt, ako je to vidieť na obr. 12.16.



Navíjanie sa robí v skrutkovici tesne priliehajúcimi závitmi rovnomernou rýchlosťou. Po navíjaní môže nasledovať aj odvíjanie skúšaného drôtu, ak to predpisuje norma. Vzorka vyhovela, ak po navinutí (resp. po odvinutí) nemá na povrchu viditeľné rozdvojenia, odlúpnutie vrstvy, trhliny, zlomeniny a pod.

Obr. 12.16 Skúška drôtov navíjaním

## 6. Skúška drôtov krútením - (ISO 7800)

Skúšajú sa drôty s priemerom  $0,3$  až  $10\text{ mm}$  krútením v jednom alebo v dvoch smeroch až do úplného porušenia alebo do dosiahnutia stanoveného počtu krutov. Skúšaný drôt sa na jeho koncoch zachytí do čeľusti, pričom vzdialenosť  $L_c$  medzi čeľusťami sa volí podľa priemeru drôtu. Do priemeru  $d = 1\text{ mm}$  je  $L_c = 200 \cdot d$ , od  $1$  do  $5\text{ mm}$  je  $L_c = 100 \cdot d$  a od  $5$  do  $10\text{ mm}$  je  $L_c = 50 \cdot d$ . Drôt sa skrúca rovnomernou rýchlosťou približne  $1$  otáčku za sekundu. Počet otáčok registruje otáčkomer prístroja a do celkového počtu sa započítavajú len úplne dokončené skrútenia. Skúška vyhovela, ak počet skrútení do porušenia je väčší, ako predpisuje materiálový list pre skúšaný materiál.

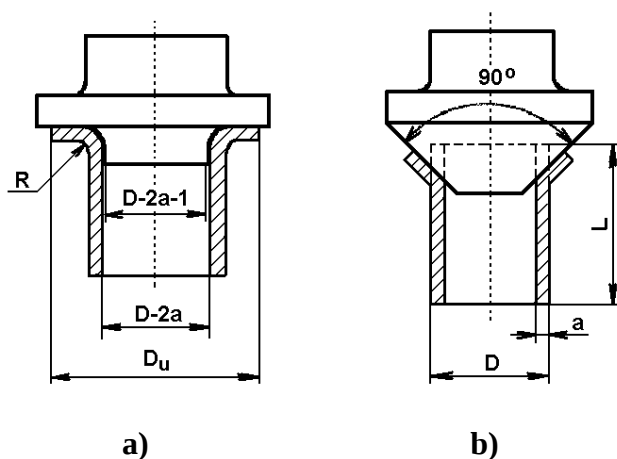
## 7. Skúška drôtov striedavým ohýbaním - (ISO 7801)

Touto skúškou sa skúšajú drôty a priemerom od  $0,3$  do  $10\text{ mm}$ . Princíp skúšky je podobný ako pri skúške lámavosti plechov striedavým ohybom (obr. 12.14). Polomer ohybných valčekov sa volí podľa priemeru drôtu (približne  $R = 2,5 \cdot d$ ) a vzdialenosť unášača približne  $h = 10 \cdot d$ . Pri skúške sa drôt striedavo ohýba na obe strany o  $90^\circ$ , pričom frekvencia ohýbania nesmie prekročiť  $1$  ohyb za sekundu, aby nedošlo k ohrevu vzorky a zisťuje sa počet ohybov do zlomenia drôtu alebo do predpísaného počtu podľa materiálového listu.

## Technologické skúšky rúrok - STN 42 0415

Pri montáži zariadení sa rúrky veľmi často rôznym spôsobom deformujú za studena, pričom táto deformácia nesmie spôsobiť vznik trhlín. Vhodnosť materiálu rúrok z ocele a neželezných kovov k deformácii je možné zisťovať pomocou technologických skúšok a to:

- skúšky rúrok ohybom podľa EN ISO 8491,
- skúšky rúrok sploštením podľa EN ISO 8492,
- skúšky rúr rozširovaním prstenca podľa STN EN ISO 8495,
- skúšky rúrok prstencovým ťahom podľa ISO 8496,

**8. Skúšky rúrok lemovaním - STN EN ISO 8494**

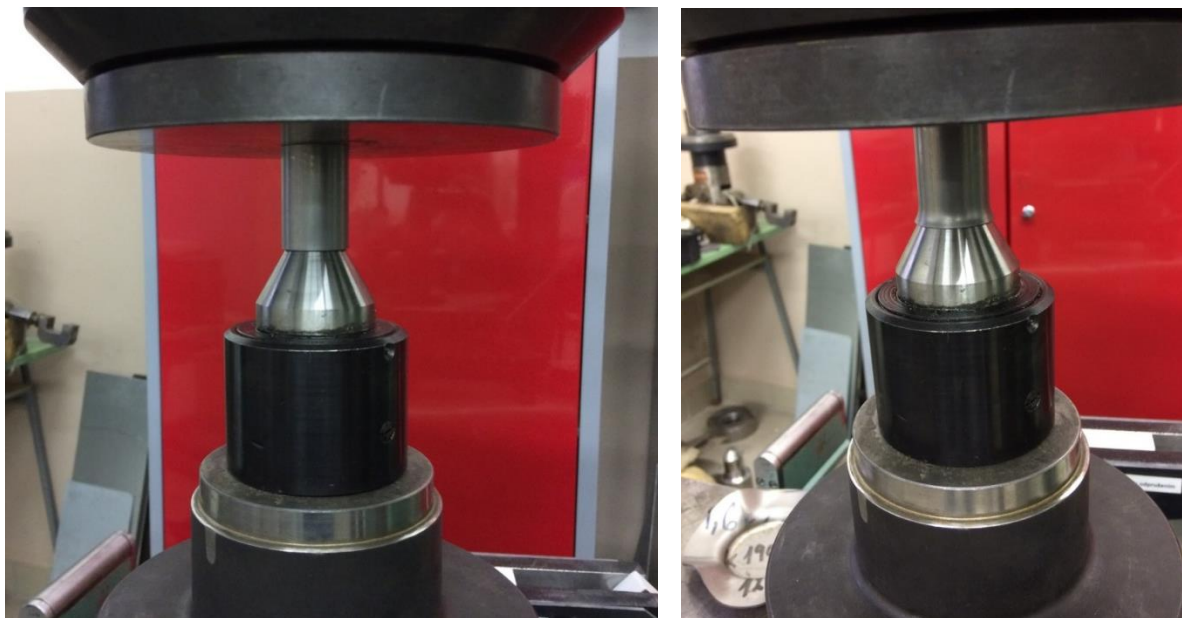
Obr. 12.17 Princíp skúšok lemovaním:  
a) štandardným trňom, b) kužeľovitým trňom

Cieľom skúšky je zistiť, či rúrka vydrží bez porušenia deformáciu, ktorá vzniká olemovaním jej konca. Skúšajú sa rúrky do vonkajšieho priemeru  $D = 150 \text{ mm}$  a hrúbky steny  $a$  do  $9 \text{ mm}$ . Princíp skúšky je na obr. 12.17. Zo skúšanej rúry sa odoberie vzorka dĺžky  $L$ , rovnej približne priemeru  $D$ . Lem na rúrke sa vytvorí plynulým vtlačovaním trňa (obr. 12.17a) do dosiahnutia priemeru lemu  $D_u$ , ktorý je predpísaný materiálovým listom. Skúšať sa môže aj kužeľovitým trňom, ktorým sa vytvorí rozšírenie rúry (obr.

12.17b) a lem sa vytvorí plochou platňou. Skúška vyhovela, ak po lemovaní na skúšobnej vzorke nevzniknú trhliny, alebo lom.

**9. Skúšky rúrok rozširovaním - STN EN ISO 8493**

Cieľom skúšky je zistiť deformačnú schopnosť rúry jej rozšírením o určitú hodnotu (Obr. 12.18 a, b). Skúšajú sa rúry do vonkajšieho priemeru  $D = 150 \text{ mm}$  a hrúbky steny  $a$  do  $9 \text{ mm}$ .

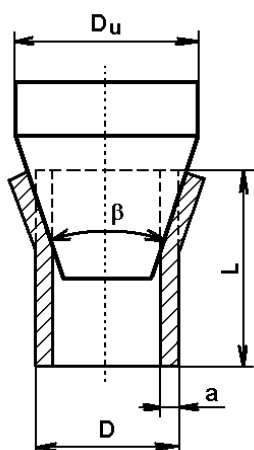


Obr. 12.18 Skúška rúrok rozširovaním a) rúrka pred zaťažením b) rúrka po zaťažení

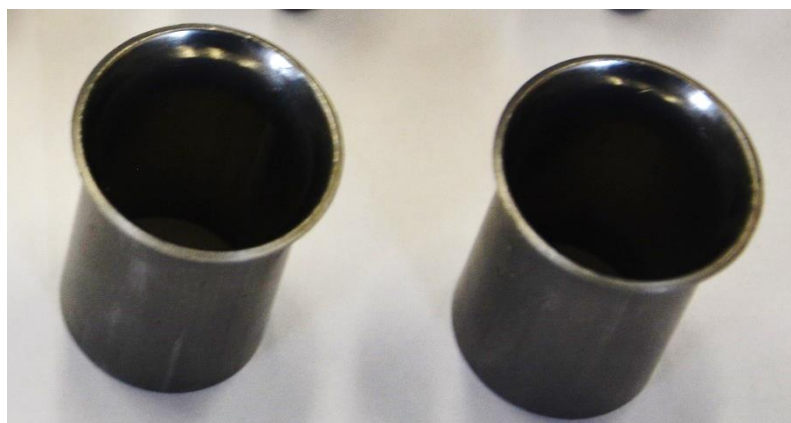
Zo skúšanej rúry sa odoberie vzorka dĺžky  $L = 2.D$ . Do takto pripravenej vzorky sa statický vtláča kužeľovitý trň - obr. 12.19. Vrcholový uhol  $\beta$  a najväčší priemer rozšírenej časti vzorky  $D_u$  sa určujú z materiálových listov. Pomerné predĺženie  $x$  sa udáva v %.

$$x = \frac{D_u - D}{D} \cdot 100\% \quad (12.3)$$

Skúška vyhovela, ak pri danom pomernom rozšírení nevznikne na rúrke trhlinka (Obr.12.16).



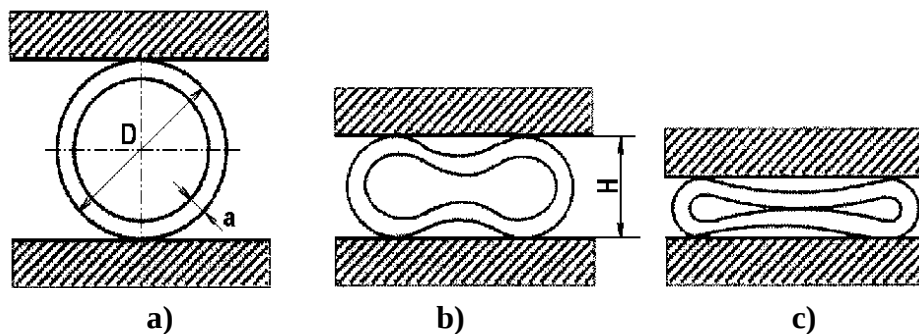
Obr. 12.19 Princíp skúšky rúrok rozširovaním



Obr. 12.20 Detail rozšíreného konca rúrok po skúške

### 10. Skúšky rúrok stláčaním - STN EN ISO 8492

Cieľom skúšky je zistiť odolnosť rúrky proti porušeniu stlačením stien v smere kolmom na os. Skúšajú sa rúry do vonkajšieho priemeru rúr  $400 \text{ mm}$  s hrúbkou steny do  $15 \%$  vonkajšieho priemeru  $D$ . Dĺžka vzorky sa volí  $1,5$  násobok vnútorného priemeru rúry, najviac však  $100 \text{ mm}$ . Princíp skúšky je na obr. 12.21. Rúrka sa stláča pomalým tlakom medzi dvoma platňami na výšku  $H$  (obr. 12.21b) alebo do úplného stlačenia (obr. 12.21c). Pri skúške zvarených rúrok zvar sa orientuje do roviny prechádzajúcej osou rúrky a zvierajúcej s rovinou tlačných platní uhol  $45^\circ$ . Skúška vyhovela, ak po predpísanom stlačení sa na stenách rúrky neobjavila trhlinka.



Obr. 12.21 Princíp skúšok rúrok stlačením

a) rúrka pred deštrukciou b) rúrka po deštrukcii na výšku H  
c) rúrka po úplnom stlačení



Obr. 12.22 Tenkostenné rúrky po stlačení na predpísanú hodnotu

### Hodnotenie prekaliteľnosti ocelí

**Prekaliteľnosť** je technologická vlastnosť definujúca schopnosť ocele nadobudnúť po kalení tvrdosť zodpovedajúcu kaliteľnosti, alebo určitú dohovorenú hodnotu z nej odvodenú, v určitej hĺbke pod ochladzovaným povrchom kaleného výrobku. Závisí od vzťahu medzi kritickou rýchlosťou ochladzovania a skutočnou rýchlosťou ochladzovania v uvažovanej povrchovej vrstve. **Kritická rýchlosť ochladzovania** ocele závisí od chemického zloženia austenitu, od homogenity austenitu, prítomnosti nerozpustných fáz (karbidy, inklúzie) a od veľkosti austenitického zrna. Faktory, ktoré znižujú kritickú rýchlosť ochladzovania, zvyšujú prekaliteľnosť. **Kritická rýchlosť ochladzovania vyplýva z polôh kriviek začiatku premien v diagrame ARA.** Inkubačná doba rozpadu austenitu sa zväčšuje (tým sa znižuje kritická rýchlosť ochladzovania a zvyšuje sa prekaliteľnosť) so zväčšujúcim sa zrnom austenitu, s rastom jeho homogenity a s rastúcim obsahom uhlíka a legujúcich prvkov (okrem Co a Al). Na zvýšenie prekaliteľnosti konštrukčných ocelí sa používajú komplexne legované ocele, v ktorých vplyv prísadových prvkov na polohu a tvar kriviek je zvýraznený aj pri malom obsahu jednotlivých prísadových prvkov.

Ocele sa kalia z kaliacich teplôt do vody alebo do oleja. U uhlíkových ocelí ležia tieto teploty asi 20 až 50 °C nad teplotou  $A_{c3}$ . Zliatinové prvky posúvajú body premeny a tým menia

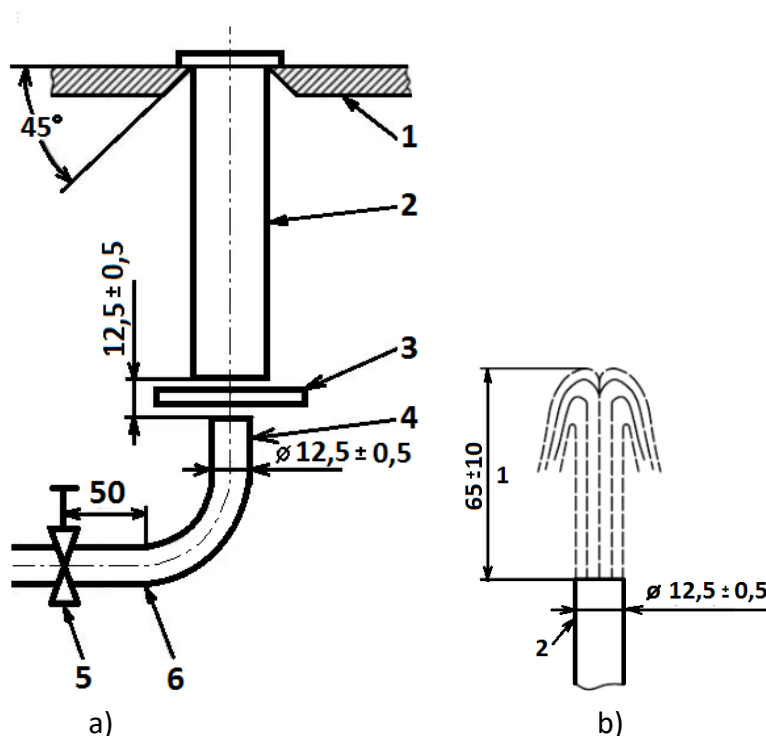
aj hodnoty kaliacej teploty. Výhodná kombinácia mechanických vlastností po zušľachtení sa dosiahne len u súčastí, ktoré boli v celom priereze prekalené.

Uhlíkové ocele na zušľachťovanie sa prekalujú s čisto martenzitickou štruktúrou v celom priereze len asi do priemeru 5 mm. Všetky legujúce prvky v zliatinových oceliach na zušľachťovanie zvyšujú prekaliteľnosť, a tým ovplyvňujú aj voľbu vhodného ochladzovacieho prostredia pre daný rozmer a tvar súčiastky.

U ušľachtilých konštrukčných ocelí sa za prekaliteľný priemer považuje najväčší priemer nekonečne dlhej valcovej tyče, ktorá po zakalení do daného prostredia má v osi minimálne tvrdosť zodpovedajúcu tvrdosti štruktúry s 50 % martenzitu.

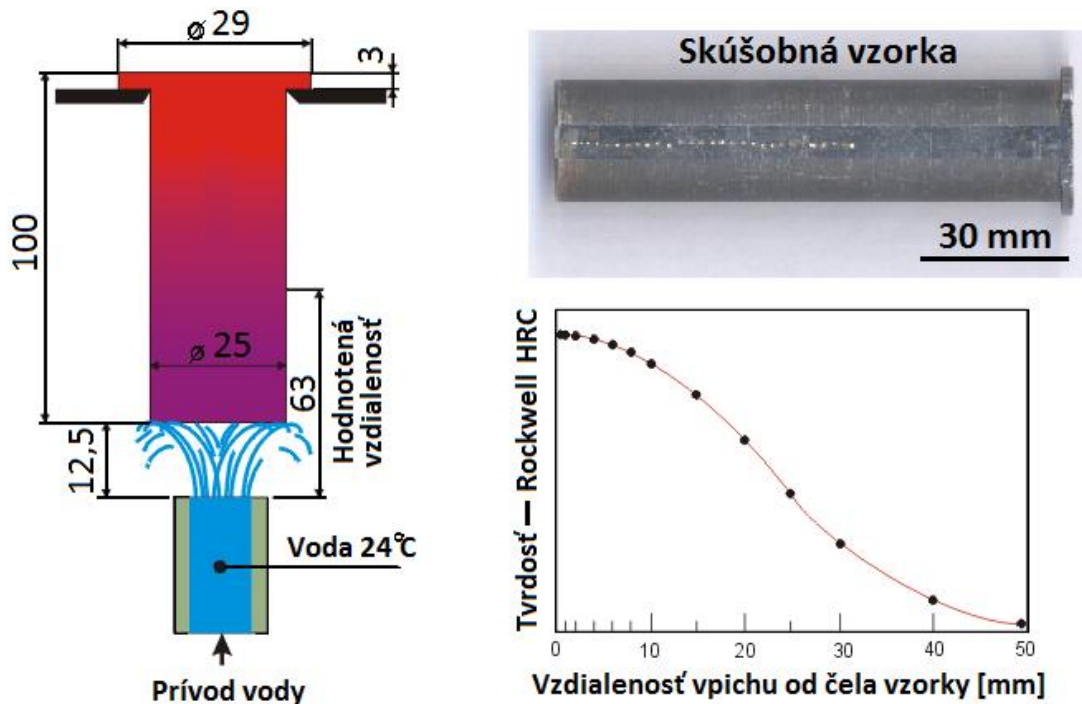
### 11. Hodnotenie prekaliteľnosti

Prekaliteľnosť je možné hodnotiť podľa STN EN ISO 642 Jominyho skúškou. Jedná sa o nepriamú skúšku, ktorá sa nehodí pre ocele s veľmi malou prekaliteľnosťou a pre ocele kaliteľné na vzduchu. Pri tejto metóde sa po dokonalej austenitizácii pri predpísanej kaliacej teplote kalí prúdom vody spodné čelo skúšobného telieska (valčeka) rýchlosťou ochladzovania cca. 1000°C/s. Horné čelo sa ochladzuje na vzduchu rýchlosťou asi 3°C/s. (Obr. 12.23 a Obr. 12.24)



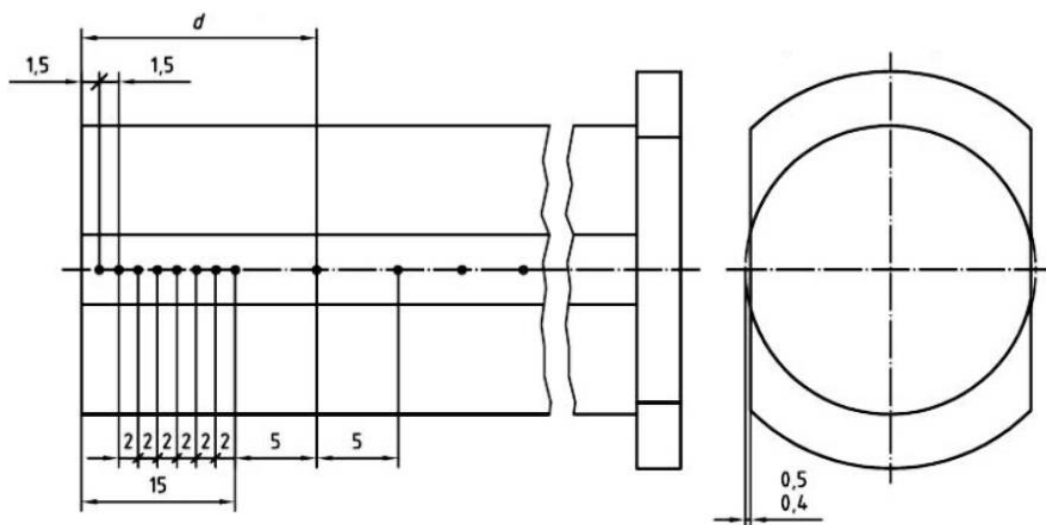
Obr. 12.23 Schéma zariadenia pre nepriamu skúšku prekaliteľnosti

- a) 1 – držiak vzorky, 2 – skúšobná vzorka, 3 – clona, 4 – dýza prívodu vody, 5 – uzatvárací ventil, 6 – potrubie na prívod vody, b) normou predpísané rozmery skúšky : 1 – výška vodného lúča, 2 – priemer dýzy



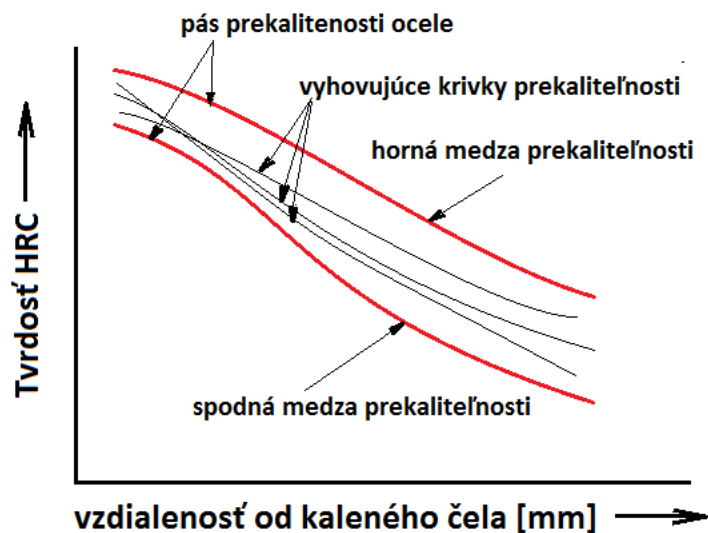
Obr. 12.24 Jominiho skúška prekaliteľnosti – princíp, priebeh tvrdosti HRC a skúšobná (zakalená) vzorka po meraní tvrdosti

Na vychladnutej vzorke po kalení sa po jej dĺžke vybrúsia dve protiľahlé plošky (obr. 12.25) do hĺbky 0,4 až 0,5 mm. Na týchto plochách sa realizujú merania tvrdosti v predpísaných vzdialenostiach od kaleného čela smerom k jej upínacej časti. Namerané hodnoty tvrdosti *HRC*, alebo *HV* sa zaznamenajú v diagrame v závislosti na vzdialenosti od kaleného čela. Takto vyhotovená krivka prekaliteľnosti charakterizuje danú tavbu ocele. Stanovením kriviek prekaliteľnosti pre celé prípustné rozmedzie chemického zloženia danej ocele dostávame pás prekaliteľnosti, ohraničený okrajovými krivkami – tzv. hornou a spodnou medznou krivkou prekaliteľnosti (obr. 12.26).

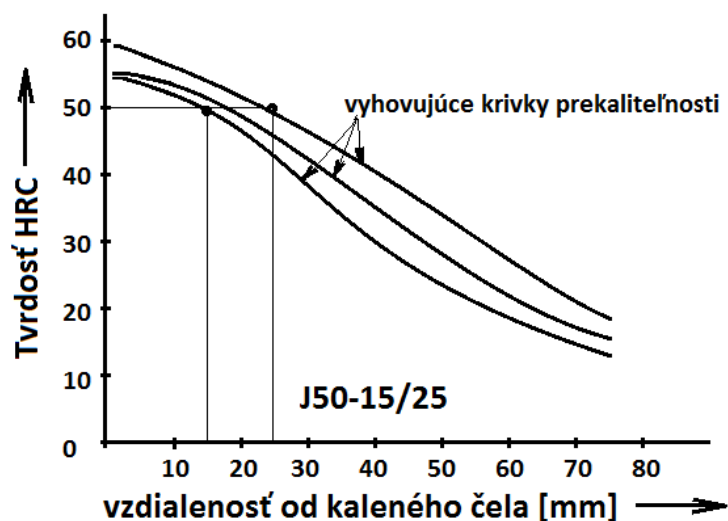


Obr. 12.25 Tvar skúšobnej vzorky pre hodnotenie prekaliteľnosti

Prekaliteľnosť podľa tejto metódy môže byť vyjadrená aj pomocou indexu prekaliteľnosti  $JH - d$ , pričom  $H$  je tvrdosť v  $HRC$  alebo  $HV$ ,  $d$  – je vzdialenosť nameranej tvrdosti od spodného čela vzorky. (napr.  $J50-15/25$  – znamená že tvrdosť  $50 HRC$  sa nachádza vo vzdialenosti  $15$  až  $25 mm$  (Obr. 12.27).



Obr. 12.26 Medzná krivka prekaliteľnosti



Obr. 12.27 Index prekaliteľnosti  $J50-15/25$  vyhodnotený pomocou nepriamej (Jominiho) skúšky

Index prekaliteľnosti môže byť definovaný tiež pre rozsah hodnôt tvrdosti na konkrétnej vzdialenosti skúšobnej vzorky. (napr.  $J45/40-20$  znamená že tvrdosť v intervale  $45$  až  $40 HRC$  sa má nahádzať vo vzdialenosti  $20 mm$  od čela vzorky.

**Úlohy:**

- Stanovte vhodnosť ocelového plechu pre hlboké ťahanie skúškou hĺbením podľa Erichsen a určite jeho Erichsenove číslo.
- Skúškou drôtov navíjaním porovnajte technologické vlastnosti drôtov z rôznych materiálov.
- Vypracujte medznú krivku prekaliteľnosti pre zadaný typ kalenej ocele.

**Téma č. 13: HODNOTENIE ZVARITEĽNOSTI A SPÁJKOVATEĽNOSTI MATERIÁLOV****ZVARITEĽNOSŤ MATERIÁLOV**

Zvariteľnosť je podľa Českej normy ČSN 05 0000 a tiež aj Americkej normy AWS A 3.0:2001 definovaná ako spôsobilosť materiálu vytvoriť zváraním pri určitých technologických podmienkach, zvarové spoje požadovaných vlastností.

Zvariteľnosť sa všeobecne hodnotí posudzovaním degradácie celistvosti a vlastností zvarového spoja v porovnaní s neovplyvneným základným materiálom. Vlastnosti, ktoré sú pre hodnotenie degradácie smerodajné sa považujú za ukazovatele zvariteľnosti.

Podľa STN 05 1309 sa na hodnotenie zvariteľnosti používajú dve skupiny ukazovateľov:

- **Ukazovatele celistvosti zvarových spojov**, charakterizujúce odolnosť zvarových spojov voči vzniku trhlín a iných neprípustných chýb.
- **Ukazovatele vlastností zvarových spojov**, charakterizujúce zmeny jednotlivých vlastností kovu v oblasti zvarového spoja v dôsledku zvárania.

Ukazovatele celistvosti zvarových spojov rozlišujeme podľa štyroch základných typov trhlín na:

- a) **Horúce trhliny**, označované tiež ako trhliny za tepla, sú trhliny, ktoré vznikajú pri ochladzovaní zvarových spojov pri vysokých teplotách. V oceliach vznikajú nad teplotou 850 °C. Podľa súčasnej klasifikácie rozlišujeme tri typy horúcich trhlín vo zvarových spojoch.
  1. **kryštalizačné** (solidifikačné) vznikajú vo zvarovom kove v priebehu jeho tuhnutia (kryštalizácie),
  2. **likvačné** - vznikajú vo vysoko vyhriatom (podhúsenicovom) pásme teplom ovplyvnenej oblasti základného materiálu, alebo aj zvarového kovu pri viac húsenicovom zvare,
  3. **polygonizačné**, označované tiež ako trhliny z poklesu ťažnosti, môžu vznikať rovnako ako likvačné v teplom ovplyvnenej oblasti základného materiálu alebo zvarového kovu a pri nižšej teplote (~850 °C). Polygonizačné trhliny sú však charakteristické len pre vysokolegované austenitické ocele a Ni-zliatiny.
- b) **Studené trhliny** nazývané tiež vodíkom indukované trhliny, ak vznikajú po určitom čase (cca. 24 hod.) od skončenia zvárania nazývajú sa oneskorené trhliny – vznikajú pri teplotách pod 300 °C v *TOO* a v jedno a viac vrstvových spojoch vyššej pevnosti. Pravdepodobnosť ich vzniku stúpa prítomnosťou martenzitických a bainitických štruktúr vo zvarovom kove či *TOO*. Ich vzniku pomáha vysoká koncentrácia vodíka v *ZK* a *TOO*, do ktorých sa H dostáva z obalovej hmoty elektród, taviva, vlhkosti okolitého prostredia, z nečistých ochranných plynov alebo z nedostatočne očistených drôtov a

zvarových hrán. V nemalej miere k ich vzniku prispieva aj tuhosť upnutia, ktorá po zvaraní vyvolá vznik kontrakčných napätí vo zvarovom spoji.

- c) **Lamelárne trhliny** sú typom defektu v oblasti zvarového spoja, ktorý sa môže vyskytnúť vtedy, ak je oblasť *TOO* namáhaná pri zvaraní v smere hrúbky plechu. Tieto trhliny sa väčšinou vyskytujú na konci *TOO* alebo v základnom materiáli. Trhliny majú kaskádovitý (stupňovitý) tvar, väčšinou rovnobežný s povrchom plechu. Môžu v oblasti zvarových spojov iniciovať dvoma spôsobmi:

1. **exogénne**, z defektu iného typu, napr. z horúcej mikrotrhliny,
2. **endogénne**, ak vzniká následkom vysokého namáhania v smere osi z ťahenia.

- d) **Žihacie trhliny** sú interkryštalové trhliny vo vysokovyhriatom pásme teplom ovplyvnenej oblasti (zriedkavejšie i vo zvarovom kove), ktoré vznikajú a šíria sa vplyvom žihania zvarových spojov na zmenšenie vnútorných napätí. Rozlišujú sa dva základné typy žihacích trhlín:

1. **nízkotepločné** – vyskytujú sa v rozsahu 200 °C až 300 °C,
2. **vysokotepločné** - (vyskytujú sa pri teplotách nad 300°C), ich príčinou je vyčerpanie plasticity kritickej zóny teplom ovplyvnenej oblasti v priebehu žihania, presnejšie, v priebehu relaxácie zvyškových napätí.

Špeciálnym prípadom vysokotepločných žihacích trhlín sú **podnávarové trhliny**, ktoré sa prednostne vyskytujú v hrubozrnnej teplom ovplyvnenej oblasti vyhriatej vplyvom susedného návaru na teplotu tesne pod  $A_{Cl}$ . Sú orientované pod uhlom 45 až 90° k smeru navárania. Vznikajú počas navárania páskovou austenitickou elektródou.

### Teplotný režim zvarovania

- 1) **Teplota predhrevu** – predhriatie zvarencov na predpísanú teplotu – (150°C - 400°C) napomáha vydifundovaniu vodíka zo zvarového kovu a spomaľuje rýchlosť chladnutia zvaru (menšie nebezpečenstvo zakalenia *TOO*).

### Potrebu predhrevu definuje uhlíkový ekvivalent $C_E$

V praxi sa zvariteľnosť ocelí posudzuje podľa obsahu uhlíka a legujúcich prvkov. Pretože uhlík má najväčší vplyv na zvariteľnosť ocelí, podiel prísadových a legujúcich prvkov v oceli sa prepočítava na množstvo uhlíka, ktoré je vyjadrené uhlíkovým ekvivalentom  $C_E$ .

V odbornej literatúre je vzťah pre uhlíkový ekvivalent uvádzaný pre jednotlivé ocele podľa obsahu uhlíka (nízkouhlíkové, stredneuhlíkové a pod.) a podľa obsahu legujúcich prvkov.

Uhlíkový ekvivalent pre **nízkouhlíkové ocele** (do 0,22 % C) sa vypočíta:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{4} + \frac{P+S}{2} \quad [\%] \quad (13.1)$$

Podľa uhlíkového ekvivalentu sa potom určí, či je potrebné pri zváraní použiť predhrev. V prípade nízkouhlíkových ocelí platí:

ak  $C_E < 0,45 \%$  je možné zvärať bez predhrevu,

ak  $C_E > 0,45 \%$  je potrebné použiť predhrev pred zváraním.

Pre **nízko a stredne legované** ocele udáva IIW (International Institute of Welding – medzinárodný zvaračský inštitút) vzťah:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad [\%] \quad (13.2)$$

Ak  $C_E < 0,45 \%$  nie sú potrebné žiadne opatrenia pri zváraní.

So vzrastajúcim obsahom uhlíka a prísadových, resp. legujúcich prvkov je problematika posudzovania zvariteľnosti zložitejšia. V takýchto prípadoch uhlíkový ekvivalent dosahuje vysoké hodnoty ( $C_E > 0,45 \%$ ) a pri zváraní je potrebné dodržiavať ďalšie technologické opatrenia (predhrev, dohrev).

Teplota predhrevu ( $T_p$ ) sa vypočíta podľa Seferiana:

$$T_p = 350\sqrt{C_p - 0,25} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (13.3)$$

$$C_p = C_c + C_h \quad (13.4)$$

$$C_c = \frac{360C + 40(Mn + Cr) + 20Ni + 28Mo}{360} \quad [\%] \quad (13.5)$$

$$C_h = 0,005 \cdot h \cdot C_c \quad (13.6)$$

kde:  $h$  – hrúbka zváraného materiálu [mm].

Ak nie je predhrev potrebný vzhľadom na uhlíkový ekvivalent, pri hrúbke zváraného materiálu väčšej ako 20 mm sa odporúča v zmysle STN EN 1011-1.

**2) Medzivrstvová teplota (medzihúsenicová teplota – teplota interpass)** - jej úlohou je udržať zvar v procese zvárania na ustálenej teplote pri viacvrstvových zvaroch. Kritická oblasť zvaru je koreňová vrstva (najväčší stupeň premiešania so ZM, ktorý má vysoký obsah C, čo môže viesť ku vzniku tvrdej štruktúry) aj z hľadiska namáhania, na zváranie koreňovej vrstvy sa používa technika Hot-pass na koreňovú húsenicu (krátku) sa nanáša ďalšia – výplňová húsenica ešte za tepla koreňovej húsenice, ktorá popustí koreňovú húsenicu.

Pre výpočet medzivrstvovej teploty je možné použiť vzorec 13.7.

$$T_{ip} = 120 \cdot \log \frac{H_D}{3,5} + 5,0(s - 20) + 0,8(R_{mk} - 830) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (13.7)$$

kde:  $T_{ip}$  – medzivrstvová teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$H_D$  – obsah difúzneho vodíka v zvarovom kove v ml/100g,

$s$  – hrúbka zvaru (max.40mm),

$R_{mk}$  – pevnosť zvarového kovu (600 – 900 MPa).

**3) Dohrev** - zvarenca sa realizuje v rozsahu 200 – 300 $^{\circ}\text{C}$  za 1hod, za účelom predĺženia času na difundáciu vodíka zo zvarového spoja. U zvarov z vysokolegovaných ocelí sa používajú za účelom spomalenia ochladzovania izolačné zábaly.

**4) Tepelné spracovanie zvarových spojov** (vo WPS sa udáva teplota a čas zotrvania zvarenca na tejto teplote v hod.).

Zváranie je definované ako tavné, tavno-tlakové, resp. tlakové spájanie materiálov do nerozoberateľných celkov. Pri každom spôsobe zvárania vznikajú v miestach zvarových spojov napätia a deformácie. Tieto je možné odstrániť použitím tepelného a mechanického spracovania. Spôsob spracovania je určený predpísanými normami pre konkrétny výrobok. Cieľom tepelného spracovania je: zníženie zvyškových napätí a zníženie hodnôt tvrdosti v TOO, zlepšenie odolnosti proti krehkému porušeniu a koróznemu praskaniu, zníženie obsahu uhlíka a rizika vzniku oneskorených trhlin, zabezpečenie rozmerovej stálosti zvaranej konštrukcie.

Tepelné spracovanie je možné realizovať :

- lokálne (v oblasti zvaru, najmä u rozmerných zvaraných konštrukcií),

kde sa ohrev realizuje:

- plameňom,
- elektrickým odporovým ohrevom,
- elektrickým indukčným ohrevom,
- tepelným spracovaním celého zvarenca (v peciach).

Medzi parametre tepelného spracovania patria:

- teplota žihania  $T_z$ ,
- zotrvanie na teplote žihania  $t_z$ ,
- rýchlosť ohrevu  $v_h$ ,
- rýchlosť ochladzovania  $v_c$ .

Tepelné spracovanie zvarových spojov definuje STN 05 0211, ktorá uvádza nasledujúce spôsoby tepelného spracovania:

- **Relaxačné žihanie – žihanie na zníženie napätí.** Najpoužívanější spôsob tepelného spracovania zvarencov. Teplota žihania sa stanovuje na základe chemického zloženia zváraného materiálu a výdrž na teplote žihania závisí od hrúbky materiálu. Teplota žihania je v rozsahu 500°C - 650°C. Výdrž súčiastky na žihacej teplote je obvykle 1-2 hod. Zvyškové napätia sa relaxačným žihamím znižia na úroveň (0,15 až 0,30)  $R_e$ .

- **Medzioperačné žihanie** - teplota medzioperačného žihania musí byť nižšia najmenej o 15°C ako menovitá teplota konečného žihania na zmenšenie napätí.

- **Normalizačné žihanie** - teplota žihania a teplota popúšťania sa stanovuje podľa chemického zloženia ocele a zvarového kovu spoja. Výdrž na predpísanej teplote závisí od maximálnej hrúbky žihaného zvarenca. Teploty normalizačného žihania sú v intervale 30°C - 50°C nad teplotu  $A_{c3}$ , resp.  $A_{cm} + 30^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$ . Čas žihania až do ukončenia austenitizácie štruktúry, s pomalým ochladzovaním na vzduchu. Cieľom normalizačného žihania je zjemnenie austenitického zrna, a získanie rovnomernej mikroštruktúry po celom priereze.

- **Žihanie s čiastočnou austenitizáciou** (medzi  $A_{c1}$  a  $A_{c1}$ ). Využíva sa iba u podeutektoidných ocelí. Pozostáva z ohrevu na teplotu medzi  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ , zotrvania na teplote, pri ktorej sa vytvorí feriticko-austenitická mikroštruktúra a následného ochladzovania v peci alebo na vzduchu.

- **Žihanie na zníženie obsahu vodíka – protivločkové žihanie.** Má za úlohu zníženie obsahu vodíka vo zvarovom kove a tým zamedzenie vzniku oneskorených trhlín. Žihanie sa uskutočňuje ochladzovaním z austenitického stavu do teplotnej oblasti  $A_1 - M_s$  (martenzit štart), opätovným zvýšením teploty tesne pod  $A_{c1}$  (650°C - 700°C) a zotrvaním na tejto teplote, pri ktorej difunduje vodík zo zvarového kovu. Uplatňuje sa najmä u martenzitických štruktúr zvarového kovu. Ochladzovanie býva pomalé, asi 5° za hod.

- **Popúšťanie** je ohrev na teplotu (300°C - 650°C) u martenzitických ocelí nie viac ako  $A_1$ , následne voľné ochladzovanie zvarenca na normálnu teplotu.

- Druhy popúšťania:
- nízкотeplotné (150°C - 350°C)
  - vysokoteplotné (350°C - 650°C)

### **HODNOTENIE HORÚCEJ PRASKAVOSTI**

Vznik horúcich trhlín môžeme spozorovať počas kryštalizácie zvarového kovu, alebo počas toho, ako sa tepelne ovplyvňuje napr. ďalšou vrstvou zvaru. Praskanie vzniká pri vysokých teplotách medzi oblasťou likvidu a solidu. Horúca praskavosť sa najviac vyskytuje pri zváraní austenitických ocelí, v zliatinách niklu, hliníka atď. Horúce trhliny vznikajú bezprostredne po zváraní, resp. po dokončení zvaru. Tieto chyby sú často spôsobené prítomnosťou fosforu a síry vo zváraných materiáloch. Hlavnou príčinou vzniku trhlín je, že zvar v konečnej fáze tuhnutia nemá dostatočnú pevnosť, aby vydržal kontrakcie a napätie generované pri tom, ako zvarový kúpeľ tuhne.

Náchylnosť ocele na horúcu praskavosť sa dá vyjadriť parametrickými rovnicami a charakterizujú sa číslom *HCS* (Hot Crackig Sensitivity). Náchylnosť na horúcu praskavosť zvyšuje obsah Si a Ni, čo vyjadruje a nižšie uvedená parametrická rovnica.

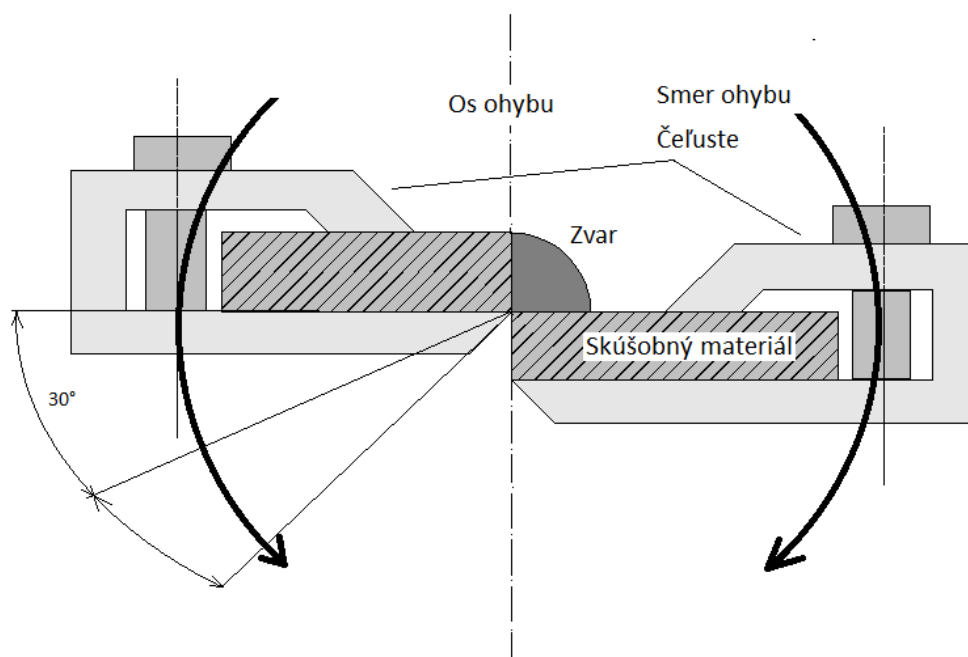
Okrem vyjadrenia náchylnosti ocele na horúcu praskavosť pomocou čísla *HCS* sa dá táto náchylnosť vyjadriť cez uhlíkový ekvivalent.

$$HCS = \frac{C(S+P+\frac{Si}{25}+\frac{Ni}{100})}{3Mn+Cr+Mo+V} \quad (13.8)$$

Náchylnosť na horúce praskanie je malá ak číslo *HCS* < 4 a pre vysokopevné ocele platí, že *HCS* < 1,6- 2.

### Skúška Murex

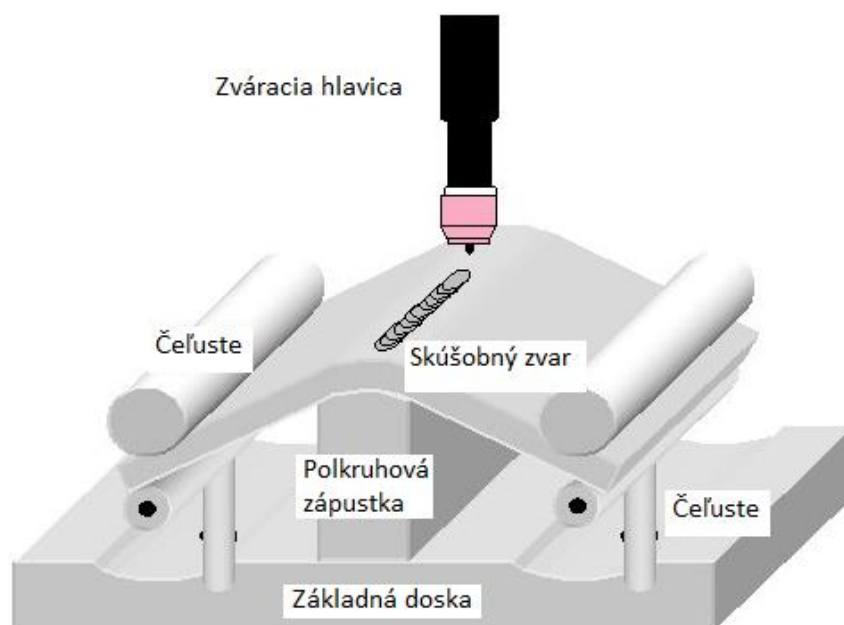
Patrí medzi skúšky s vynútenou tuhosťou. Jej schéma je na obr. 13.1. Medzi dve skúšobné platne rozmerov 50 x 70 mm a hrúbky 10 - 15 mm sa vytvorí skúšobný kútový zvar. Tieto platne musia byť pevne upnuté k dvom jednotlivým suportom a tie sa môžu pootočiť v osi koreňa zvaru. Po piatich sekundách od začiatku zvarovania sa začnú suporty navzájom natáčať a rýchlosť tohto natáčania sa môže meniť v závislosti od predpísaných podmienok skúšky. Ohyb zvaru je vykonávaný rýchlosťou približne 1°/s. Pohon na ohyb daných suportov má byť predimenzovaný tak, aby rýchlosť ohybu nijak neovplyvnila deformačný odpor zvarového kovu. Pri natáčaní suportov by mali vznikať pozdĺžne praskliny. Podmienkou tejto skúšky je to, aby bola započítaná celková dĺžka praskliny bez praskliny krátera, ktorý vznikne po skončení zvaru (cca. 12 mm).



Obr. 13.1 Schéma skúšky MUREX

**Skúška Varestraint**

Patrí k skúškam tzv. premennej tuhosti. Skúška sa realizuje na skúšobných plechoch o rozmeroch  $220 \times 50 \times 10 \text{ mm}$ , ktorého jedna aj druhá strana sa pevne upne do čeľustí prípravku (obr. 13.2) a ohýba sa v smere predpísaného ohybu po tom, čo sa aplikuje skúšobný zvar. V tomto prípade sa aplikuje napätie v ohybe v mieste, kde zvarací horák prechádza bod kontaktu medzi vzorkou a trňom. Zváranie sa vykonáva pri pokračujúcom sa ohýbaní. Je potrebné si všimnúť, že koreň je rovnobežný so smerom zvárania. Rozsah popraskania je údaj o citlivosti materiálu na horúce praskanie a vyhodnocovacím kritériom je uhol pri ktorom dôjde k praskline na povrchu zvaru.



Obr. 13.2 Schéma skúšky Varestraint

**HODNOTENIE STUDENEJ PRASKAVOSTI**

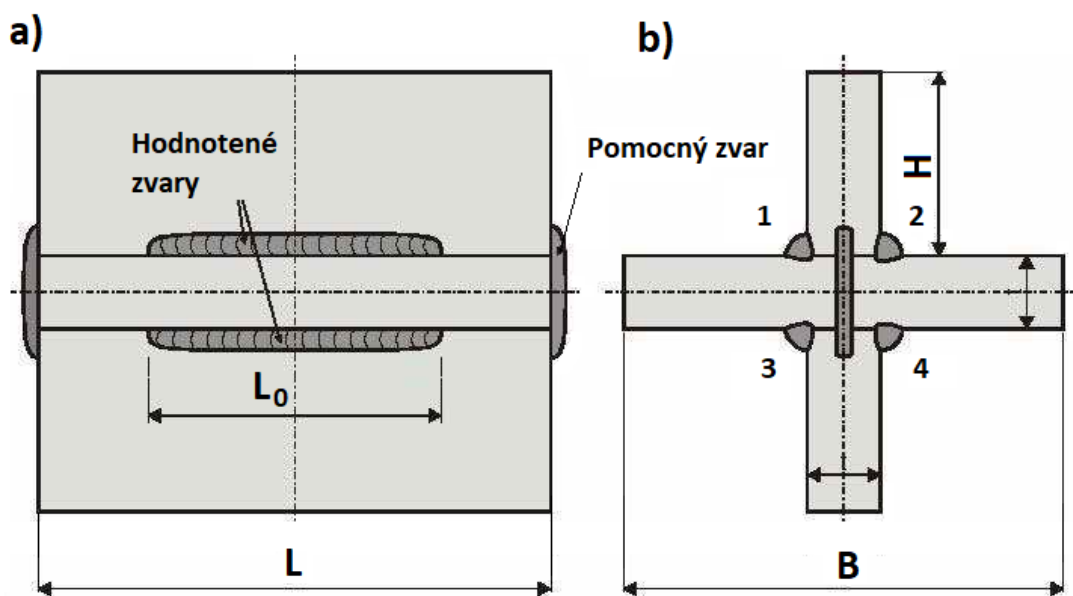
Tieto praskliny sa môžu objaviť vo zvaru alebo v tepelne ovplyvnenej oblasti (TOO). Tomuto praskaniu sa hovorí aj vodíkové praskanie a vznikne počas alebo po samotnom zváraní tj. po vychladnutí zvaru, kde teplota zvaru a TOO klesne pod  $150 - 100^\circ\text{C}$ . Vodíkové praskanie je nad touto teplotou veľmi málo pravdepodobné. Typickým znakom vodíkového praskania je oneskorenie a v niektorých prípadoch sú to hodiny či dokonca aj dni po tom, čo bol vyhotovený zvar.

**Príčiny vzniku vodíkového praskania**

- vodík prítomný vo zvarovom kove alebo v TOO,
- tvrdá mikroštruktúra náchylná na vznik trhlín (martenzit),
- vnútorné napätia vo zvarovom kove.

### Skúška Cruciform

Krížová skúška patrí ku skúškam s vlastnou tuhosťou. Do určitej miery patrí ku CTS skúške. Vzhľadom k tomu, že pri CTS skúške nie je možné, aby došlo k uhlovej kontrakcii v dôsledku geometrie vzorky a kotevných zvarov. Je potrebné zdôrazniť, že tento druh skúšobného zvaru má skreslenie pri krížovom teste. Krížová vzorka musí byť pripravená, ako je uvedené (obr. 13.3) vo zväzacom postupe. Kútové zvary musia byť vyhotovené v polohe *PB* (vodorovnej zhora). Smer zvárania a pracovná teplota musí byť rovnaká pre každý zvar. Podmienky, napr. obsah vodíka, teplota predohrevu, tepelný príkon. Predpísané rozmery skúšobných vzoriek a stanovené metódy zvárania pre skúšku Cruciform sú definované v Tab. 13.1. Cieľ testu je vyhodnotiť náchylnosť studeného praskania kútových zvarov. Skúška je vhodná pre hrúbky  $t \geq 10 \text{ mm}$ , skúška je určená pre jednovrstvový kútový zvar.



Obr. 13.3 Schéma skúšobnej vzorky pre skúšku Cruciform

Tab. 13.1 Rozmery skúšobných vzoriek a stanovené metódy zvárania

| Hrúbka platne (t) [mm] | Dĺžka vzorky (L) [mm] | Šírka vzorky (B) [mm] | Výška vzorky (H) [mm] | Dĺžka hodnoteného zvaru (L <sub>0</sub> ) [mm] | Proces zvárania*   |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------------------|--------------------|
| 10 – 15                | 150                   | 150                   | 150                   | 150                                            | MMA, MAG, MIG, TIG |
|                        | 300                   | 300                   | 150                   | 150                                            | SAW                |
| 16 - 50                | 300                   | 300                   | 150                   | 150                                            | všetky             |

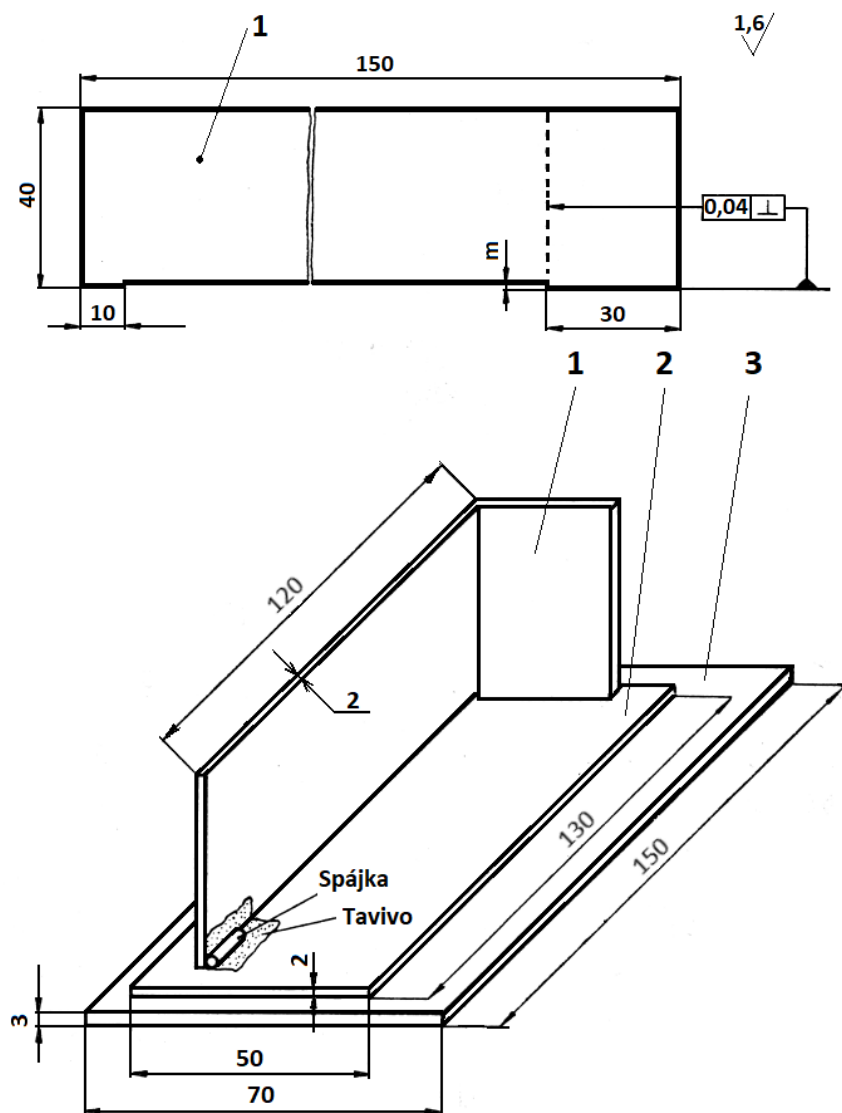
\* MMA – ručné oblúčkové zváranie obalenou elektródou, MAG – zváranie v aktívnom plyne odtavujúcou sa elektródou, MIG – zváranie v inertnom plyne odtavujúcou sa elektródou, SAW – zváranie pod tavivom

**SPÁJKOVATEĽNOSŤ MATERIÁLOV**

Spájkovateľnosť materiálov je definovaná ako je podľa STN 05 0040 definovaná ako komplexná charakteristika vyjadrujúca vzájomnú vhodnosť základného a spájkovacieho materiálu na zhotovenie spojov na požadovaný účel pri určitých technologických možnostiach spájkovania a konštrukčnej spôsobilosti spájkovaného spoja. K technologickým skúškam pri hodnotení spájkovateľnosti patria Skúška roztekavosti spájok, ktorá sa posudzuje podľa normy STN 05 0041 a skúška kapilarity v zmysle normy STN 05 0042.

**Skúšanie kapilarity – STN 05 0042**

Skúšanie kapilarity pri mäkkom spájkovaní sa realizuje na skúšobných vzorkách dokumentovaných na obr. 13.4. Skúšobná vzorka pozostáva z pásov plechov (1,2) hrúbky 2 mm. Dolná hrana plechu (1) je opracovaná tak, aby sa vytvorila medzera v spoji „m“. Pre cínové spájky je  $m = 0,1 \text{ mm}$ , pre spájky na hliníkovej báze  $m = 0,4 \text{ mm}$ . Pásik plechu (1) je ohnutý do pravého uhla kvôli stabilite pre jeho umiestnenie na pásik plechu (2).



Obr. 13.4 Rozmery skúšobných vzoriek pre skúšanie kapilarity mäkkých spájok

Hodnotené spájkované plochy musia byť očistené a pred spájkovaným chemicky odmastené. Spájka o hmotnosti  $0,5\text{ g}$  a tavivo tiež o hmotnosti  $0,5\text{ g}$ , ktoré je v tvare pasty sa umiestnia na okraj jednej strany vzorky. Ak je tavivo v tekutom stave nanesie sa na spájkovacie plochy skúšobnej vzorky. Ak sa hodnotí spájka na povrchu, ktorej je od výroby nanesené tavivo, použije sa pre skúšku také množstvo vzorky, aby v nej bolo  $0,5\text{ g}$  spájky.

Spájkovaná vzorka sa umiestni na podložku z nehrdzavejúcej ocele (3) a vloží sa vo vodorovnej polohe do vyhriatej pece na blok nehrdzavejúcej ocele s minimálnou hrúbkou  $20\text{ mm}$  ku ktorému je pripojený termočlánok pre snímanie teploty v peci. Pri skúške sa používa teplota spájkovania o  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  vyššia ako je teplota likvidu spájky. Ohrev skúšobných vzoriek sa realizuje  $2\text{ min.}$  po dosiahnutí skúšobnej teploty. Následne sa vzorky z pece vyberú a voľne ochladzujú na vzduchu. Na skúšobných vzorkách sa po odstránení taviva vyhodnocuje dĺžka zatečenia v spoji.

Protokol o skúške kapilarity obsahuje:

- spôsob spájkovania,
- označenie základného materiálu,
- označenie a tvar spájky,
- označenie a tvar taviva,
- použitú skúšobnú teplotu,
- spôsob ohrevu vzoriek,
- výsledky meraní jednotlivých vzoriek,
- priemernú hodnotu kapilarity v mm.

### Úlohy:

- Definujte pojmy zvariteľnosť a spájkovateľnosť.
- Stanovte zvariteľnosť u troch druhov vybraných ocelí a rozhodnite, či je potrebné u týchto vybraných materiálov aplikovať aj predohrev, v prípade potreby použitia predohrevu určte jeho teplotu.

## Zoznam použitej literatúry

- [1] ANDERSON, J. C. et al.: Materials Science, Stanley Thornes, United Kingdom, 1998
- [2] BREZINOVÁ, J. - GUZANOVÁ, A. - DRAGANOVSKÁ, D.: Predúpravy povrchov v teórii a praxi, TU Košice, 2012, ISBN 978-80-553-1246-0
- [3] BOELLINGHAUS T. – VIYANIT, E. – ZIMMER, P.: Cold cracking tests-revision. Dostupné na internete: <[http://www.china-weldnet.com/English/information/II-1587-06.htm#LinkTarget\\_2834](http://www.china-weldnet.com/English/information/II-1587-06.htm#LinkTarget_2834)>
- [4] BOKUVKA, O. et al.: Návod na cvičenia a náuky o materiáli I., Žilinská univerzita, 1999, ISBN 80-7100-662-9
- [5] BOKUVKA, O.: Odolnosť konštrukčných materiálov voči únave, Katedra materiálového inžinierstva, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, 33s.
- [6] ČECH, J. - GRUTKOVÁ, J. - KURIAN, J. - RODZIŇÁKOVÁ, O.: Náuka o kovoch, Návod na cvičenia. ALFA Bratislava, 1981
- [7] DOWLING, N.: Mechanical Behavior of Materials. Prentice-Hall. USA, 1993
- [8] FISCHER, G. – GRUBISIC, V.: Praxisrelevante Bewertung des Radbruchs vom ICE 884 in Eschede. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2007, 38, No. 10. 789-801, DOI: 10.1002/mawe.200700151.
- [9] FUJDA, M.: Základné rovnovážne diagramy. Učebné texty. TU v Košiciach, 2010
- [10] GRUTKOVÁ, J.: Vlastnosti a štruktúra neželezných kovov, Návod na cvičenia. ALFA Bratislava, 1980
- [11] GRUTKOVÁ, J.- RODZIŇÁKOVÁ, O.: Metalografické praktiká. ALFA Bratislava, 1973
- [12] <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/bending-flexural-test/>
- [13] IŽDINSKÁ, Z. – SEJČ, P. – ŠVEC, P.: Náuka o materiáli II, Návod na cvičenia. STU v Bratislave, 1998, ISBN 80-227-1050-4
- [14] IŽDINSKÁ, Z. – EMMER, Š. – GONDÁR, E.: Strojárske materiály. Strojnícka fakulta, STU Bratislava, 2006, 25-33, ISBN 80-227-2488-2.
- [16] JANKURA, D. a kol.: Materiály v strojárkej výrobe a technológii ich finalizácie, TU Košice, 2011, ISBN 978-80-553-0786-2.
- [17] KONEČNÁ, R. – TILLOVÁ, E.: Náuka o materiáli II, Návod na cvičenia – referáty, Žilinská univerzita, 2000, ISBN 80-7100-756-0
- [18] KOŠÚT, J.: Únava materiálov - základné poznatky a pojmy. Ústav materiálov a mechaniky strojov SAV. Dostupné na internete: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=213>
- [19] LUKÁČ, I. : Vlastnosti a štruktúra neželezných kovov. ALFA Bratislava, 1981
- [20] MARTINEC, Ľ.- ŠIMKOVIČ, M.: Náuka o materiáloch. STU Bratislava, 1997

- [21] MARTINKOVIČ, M. – HUDÁKOVÁ, M. – MORAVČÍK, R.: Náuka o materiáloch II, Návod na cvičenia. STU Bratislava, MTF, 2001, ISBN 80-227-1599-9
- [22] MIHÁLIKOVÁ, M. – BURŠÁK, M. – MIŠIČKO, R.: Náuka o materiáli, Návod na cvičenia. Technická univerzita v Košiciach, HF, 2004, ISBN 80-8073-158-6
- [23] MICHEL, J. – HIDVÉGHY, J. – BURŠÁK, M.: Náuka o materiáli, Návod na cvičenia. Technická univerzita v Košiciach, 2000, ISBN 80-7099-529-7
- [24] PUŠKÁR, A. – HAZLINGER, M.: Porušovanie a lomy súčastí. Žilinská univerzita v Žiline. 2000, 123-189, ISBN 80-7100-654-8.
- [25] PTÁČEK, L. et al.: Náuka o materiálu I. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [26] RODZIŇÁKOVÁ, O. - GRUTKOVÁ, J. - MIŠIČKO, R.: Náuka o kovoch, Návod na cvičenia, ALFA Bratislava, 1987
- [27] V. RUŽA, a kol.: Vysokoteplotné spájkovanie.1. vyd. Trnava: MtF STU, 2002. 140 s.
- [28] RUŽA, V.: Pájení. 2 vyd., Praha: SNTL/Alfa, 1988
- [29] SAVAGE, W.F. – LUNDIN, C. D.: Application of the Vareststraint Technique to the Study of Weldability. Weld. J., 45, 1966, č. 11, s. 497-503
- [30] SKOČOVSKÝ, P.: Nové konštrukčné materiály, Vybrané kapitoly. Žilinská univerzita, 1995, ISBN 80-7100-264-X
- [31] SKOČOVSKÝ, P. – BOKUVKA, O. – KONEČNÁ, R. – TILLOVÁ, E.: Náuka o materiáli pre odbory strojnícke. Žilinská univerzita v Žiline, 2001, ISBN 80-7100-831-1
- [32] SKOČOVSKÝ, P. – PALČEK, P. – KONEČNÁ, R. – VÁRKOLY, L.: Konštrukčné materiály. Žilinská univerzita v Žiline, 2000, ISBN 80-7100-608-4
- [33] SPIŠÁK, E. a kol.: Materiály pre konvenčné a progresívne technológie, TU Košice, 2012, ISBN 978-80-553-1251-4
- [34] University of Cambridge, Vareststraint Hot-ductility Test, Dostupné na internete: <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2013/Vareststraint/index.html>>
- [35] VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. ALFA Bratislava, 1985
- [36] WILKINSON, E.I. et al.: Calculating Hot Cracking Resistance of High Tensile Alloy Steel. Brit. Weld. J., 5, 1958, s. 557
- [37] ZÁBAVNÍK, V. – BURŠÁK, M.: Materiál, Tepelné spracovanie, Kontrola kvality. Technická univerzita v Košiciach, HF, 2004, ISBN 80-8073-159-4

---

prof. Ing. Janette Brezinová, PhD., prof. Ing. Ján Viňáš, PhD.,  
doc. Ing. Dagmar Draganovská, PhD., doc. Ing. Anna Guzanová, PhD.

**Základy materiálového inžinierstva – návody na cvičenia**

Vydavateľ: Technická univerzita v Košiciach  
Rok: 2020  
Vydanie: prvé  
Počet strán: 131, obrázkov: 132, tabuliek: 16  
Náklad: 50 ks  
ISBN: 978-80-553-3707-4