

Technická univerzita v Košiciach

Hutnícka fakulta

Ing. Ondrej Milkovič, PhD. – Ing. Miloš Matvija, PhD.

Náuka o materiáloch

Návody na cvičenia

Košice, 2015

Názov: **Náuka o materiáloch**

Autori: **Ing. Ondrej Milkovič, PhD., Ing. Miloš Matvija, PhD.**

Vydavateľ: **Technická univerzita v Košiciach**

Rok: **2015**

Vydanie: **prvé**

Náklad: **50 ks**

Rozsah: **75 strán**

ISBN: **978-80-553-2270-4**

Obsah

Úvod do náuky o materiáloch	3
Mechanické vlastnosti materiálov a ich skúšanie.....	7
Termická analýza, konštrukcia rovnovážnych diagramov	19
Rozbor rovnovážnych binárnych diagramov (1. časť).....	23
Rozbor rovnovážnych binárnych diagramov (2. časť).....	32
Rozbor metastabilného rovnovážneho diagramu Fe – Fe ₃ C	39
Štruktúra ocelí a ledeburitických liatin	42
Štruktúra grafitických liatin.....	48
Tepelné spracovanie materiálov, žíhanie ocelí.....	55
Tepelné spracovanie materiálov, zušľachťovanie ocelí	58
Štruktúra a vlastnosti hliníka, medi a ich zliatin	62
Štruktúra a vlastnosti plastov, keramiky a kompozitov	69

Predslov

Návody na cvičenia z predmetu Náuka o materiáloch sú určené pre poslucháčov II. ročníka Hutníckej fakulty ako pomôcka pre prípravu na cvičenia a zároveň úvod do pojmov, ktoré sú v danom tematickom celku používané. Stanovujú cieľ cvičenia, základný teoretický okruh precvičovanej látky, ako aj zadania, ktoré sú praktickou časťou obsahu cvičenia. Úlohou návodov na cvičenia nie je nahradiť teoretické znalosti, ktoré sú predmetom obsahu prednášok, ale oboznámiť študenta so základnými pojmami, s ktorými študent bude pracovať na cvičení.

Cieľom predmetu Náuky o materiáloch je poskytnúť ucelený prehľad o stavbe materiálov, termodynamických dejoch v tuhom skupenstve, mechanických vlastnostiach a možnosťami optimalizácie vlastností. Na cvičeniach je študent postavený pred praktické úlohy, ktoré musí študent zvládnuť a výsledky vedieť interpretovať.

Návody na cvičenia spracovali autori, ktorí rešpektovali postupnosť praktických tém zadávaných na predmete. Každá kapitola predstavuje samostatnú tému, ktorá je riešená v danom týždni semestra. Celkovo 12 praktických tém je uceleným obsahom cvičení z predmetu Náuka o materiáloch.

Košice, október 2015

Autori

ÚVOD DO NÁUKY O MATERIÁLOCH

Cieľ cvičenia

Oboznámiť sa s kryštalickou stavbou materiálov, poruchami kryštalickej stavby, určiť a popísať štruktúry materiálov podľa určenia štruktúrnych zložiek.

Teoretický úvod

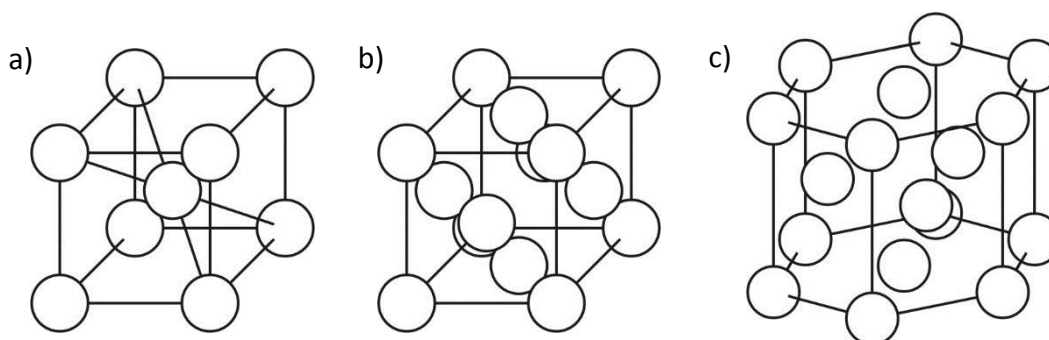
Materiály v svojej podstate sa môžu vyskytovať v piatich známych skupenstvách: plynné, kvapalné, tuhé, plazma a Bose-Einsteinov kondenzát. V predmete Náuka o materiáloch bude pojednávané okrajovo o kvapalnom skupenstve, ale hlavne o tuhom skupenstve materiálov, ktoré sa môže vyskytovať v dvoch formách zo štruktúrneho hľadiska:

- amorfné – atómy sú v látke usporiadané na krátku vzdialenosť
- kryštalické – atómy sú v látke usporiadané na dlhú vzdialenosť

Amorfné materiály majú usporiadanie na krátku vzdialenosť. Medzi amorfné materiály patria sklá, polyméry alebo aj kovové sklá, ktoré sa v takejto forme nevyskytujú v stabilnom stave.

Kovové materiály sa vyskytujú v stabilnej forme ako kryštalické materiály a sú charakteristické pravidelným usporiadaním rovnakého motívu na dlhú vzdialenosť. Poznáme sedem základných kryštalografických sústav (triklinická, monoklinická, ortorombická, trigonálna, hexagonálna, tetragonálna a kubická), v ktorých môžu kryštalizovať materiály. Z hľadiska kryštálovej symetrie sú základné priestorové mriežky rozšírené na celkovo 14. Technicky významné materiály kryštalizujú najčastejšie v nasledovných kryštalografických sústavách:

- K8 (bcc) – kubická objemovo centrovaná mriežka
- K12 (fcc) – kubická plošne centrovaná mriežka
- H12 (hcp) – hexagonálna mriežka s tesným usporiadaním

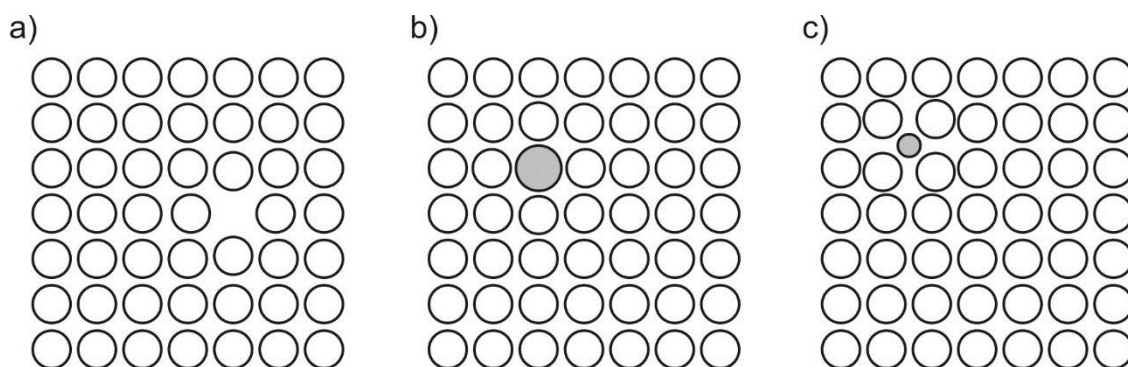


Obr. 1 Kryštalické mriežky a) K8, b) K12 a c) H12

Vlastnosti kryštalických materiálov sú silne závislé nielen od chemickej kompozície, ale taktiež od porúch stavby kryštalickej mriežky. Poruchy kryštalickej mriežky kategorizujeme na: bodové, čiarové a plošné.

Bodové poruchy

- Vakancia – atómom neobsadený regulárny uzol v kryštalickej mriežke
- Substitúcia – nahradenie atómu v regulárnom uzle kryštalickej mriežky iným atómom
- Interstícia – atóm sa nachádza v polohe medzi regulárnymi uzlami kryštalickej mriežky

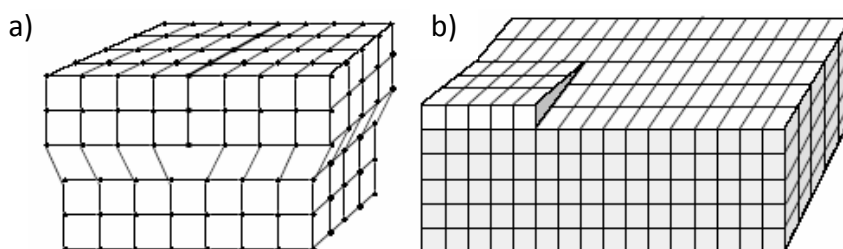


Obr. 2 Bodové poruchy kryštalickej mriežky a) vakancia, b) substitúcia a c) interstícia.

Čiarové poruchy

Čiarová porucha kryštálovej mriežky sa nazýva dislokácia a môžeme si ju predstaviť ako rad atómov, ktorý ohraničuje nadbytočnú polrovinu, Obr. 3. Dislokácie v kovových materiáloch dosahujú hustoty okolo 10^2 až 10^6 cm^{-2} (približne 500 km dislokačných čiar v 1 cm^3 železa) a sú nositeľom plastickej deformácie kryštalických materiálov. Ak na kryštalický materiál pôsobí vonkajšia sila, tak materiál môže zmeniť svoj tvar vďaka sklzovému pohybu dislokácii, čím sa zmení samotný tvar kryštalickej mriežky. Počas deformácie sa taktiež generujú nové dislokácie a ich hustota môže stúpnuť na hodnoty okolo 10^{12} cm^{-2} (približne 10 000 000 km v 1 cm^3 železa). Dislokácie podľa podstaty deformácie kryštalickej mriežky sa delia na:

- Hranové dislokácie
- Skrutkové dislokácie

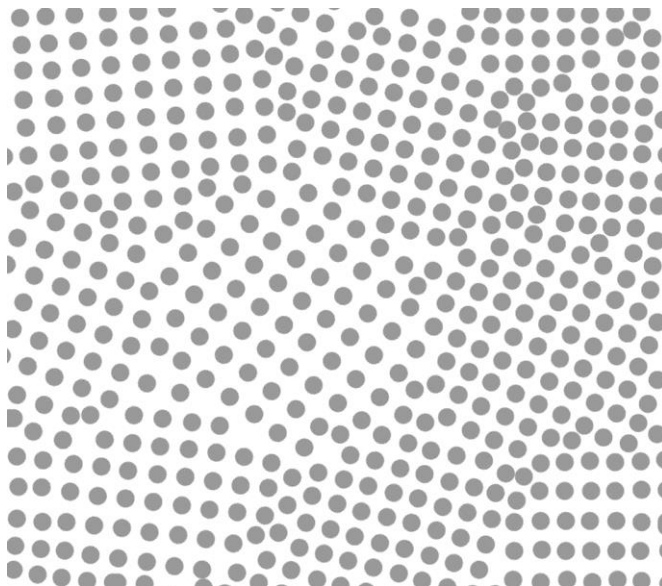


Obr. 3 Dislokácie v kryštalickej mriežke a) hranová a b) skrutková.

Plošné poruchy

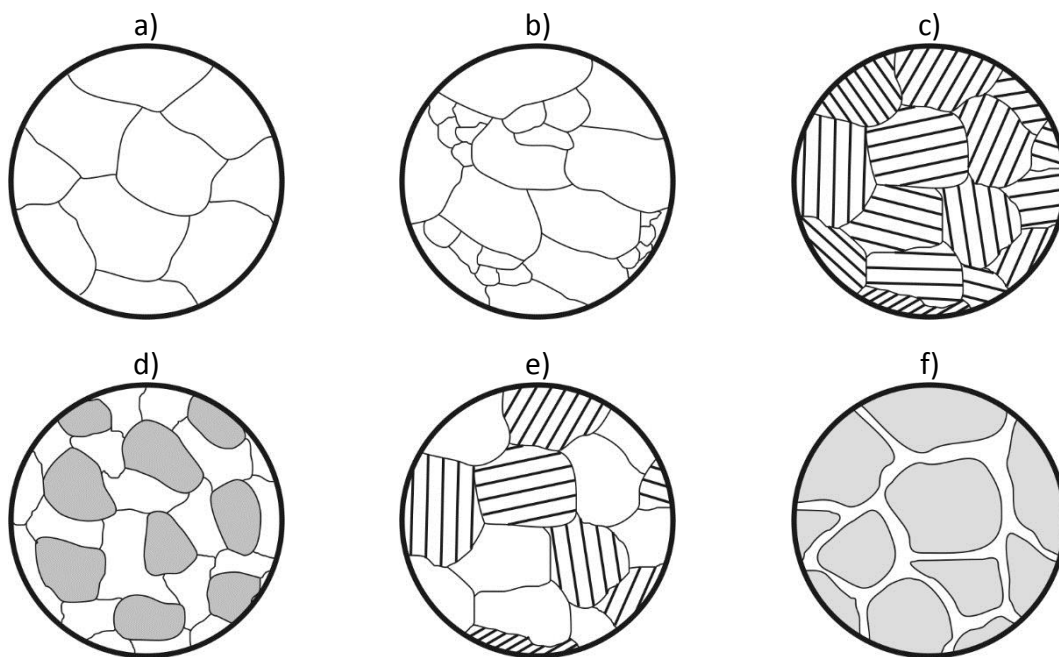
Plošná porucha je porušenie periodicity kryštalickej mriežky, ktorá má dvojrozmerný charakter, pričom v treťom rozmere je to len niekoľko atómových vzdialeností. Najčastejšie plošné poruchy kryštalickej mriežky sú:

- Hranica zrna, Obr. 4
- Hranica subzrna
- Dvojčatová hranica
- Vrstevná chyba



Obr. 4 Na rozhraní kryštalitov v polykryštalickej materiáli dochádza k porušeniu usporiadania a vzniká hranica zrna.

Ak kryštalický materiál neobsahuje hranice zŕn a kryštalická mriežka je rovnaká v celom svojom objeme a je ohraničená povrchom samotného telesa, potom nazývame materiál s takouto štruktúrou **monokryštál**. Veľká väčšina kryštalických materiálov obsahuje **hranice zrna**, ktoré od seba oddeľujú kryštalické oblasti nazývané **zrná**, čím vytvárajú **polykryštalickú** štruktúru. Zrná v pozorovanej štruktúre považujeme za **štruktúrnú zložku**, pričom štruktúrne zložky môžu byť jednofázové, dvojfázové alebo viacfázové. Schematické príklady niektorých typov štruktúr s ich popisom sú zobrazené na Obr. 5.



Obr. 5 Schematická štruktúra a) homogénna štruktúra tvorená jednofázovou štruktúrnou zložkou; b) štruktúra tvorená jednofázovou štruktúrnou zložkou s heterogénnou veľkosťou zrna; c) homogénna štruktúra tvorená dvojfázovou štruktúrnou zložkou (mechanickou zmesou); d) heterogénna štruktúra tvorená dvomi jednofázovými štruktúrnymi zložkami; e) heterogénna štruktúra tvorená štruktúrnou zložkou jednofázovou a dvojfázovou (mechanická zmes); f) heterogénna štruktúra tvorená jednofázovými štruktúrnymi zložkami, pričom jedna štruktúrna zložka je vylúčená na hraniciach zŕn.

Úlohy cvičenia

1. Určte poruchy kryštalickej mriežky na obrázku.
2. Popíšte schematické štruktúry na dodaných obrázkoch.
3. Nakreslite mriežku (*bcc*, *fcc*, *hcp*...).

MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLOV A ICH SKÚŠANIE

Cieľ cvičenia

Stanoviť mechanické vlastnosti materiálov pomocou skúšky ťahom, skúšky rázom v ohybe a skúškami tvrdosti a pochopiť interpretáciu získaných vlastností.

Teoretický úvod

Každý materiál má svoje vlastnosti, podľa ktorých je možné materiál charakterizovať a zároveň tieto vlastnosti určujú vhodnosť použitia materiálu pre konkrétnu aplikáciu. Keďže materiály môžu byť popísané mnohými vlastnosťami (magnetizmus, vodivosť, teplotná rozťažnosť, korózna odolnosť, pružnosť a pod.), boli rozdelené podľa ich fyzikálnej podstaty do štyroch základných skupín: *fyzikálne, fyzikálno-chemické, mechanické a technologické vlastnosti*. V tejto kapitole sa budeme zaoberať mechanickými vlastnosťami a ich skúšaním, pričom pojem mechanická vlastnosť materiálu môžeme definovať nasledovne:

- ***Mechanická vlastnosť materiálu je schopnosť materiálu odolávať účinkom vonkajších mechanických síl.***

Z definície vyplýva, že mechanické vlastnosti predstavujú charakter správania sa materiálu pri mechanickom namáhaní, resp. odolnosť proti deformácii a porušeniu. Preto medzi kritériami hodnotenia odolnosti materiálov voči mechanickému namáhaniu patria tieto štyri základné mechanické vlastnosti: *pružnosť, plasticnosť, pevnosť a húževnatosť*.

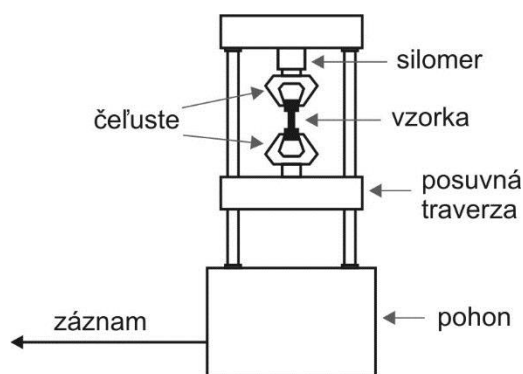
- **Pružnosť** je schopnosť materiálu pôsobením vonkajších síl meniť v tuhom stave svoj tvar pružne (vratne) bez porušenia.
- **Plasticnosť** je schopnosť materiálu pôsobením vonkajších síl meniť v tuhom stave trvale svoj tvar bez porušenia.
- **Pevnosť** je odolnosť materiálu proti trvalému porušeniu.
- **Húževnatosť** predstavuje mechanickú energiu, ktorá sa spotrebuje na plasticnú deformáciu materiálu.

Mechanické vlastnosti je potrebné zisťovať takými metódami, ktoré majú určité pravidlá, aby získané hodnoty vlastností boli zrozumiteľné a porovnateľné v každom ohľade. Existuje široká škála mechanických skúšok pre určovanie mechanických vlastností materiálov, napriek tomu v ďalšom texte sú popísané základy troch základných metód skúšania mechanických vlastností materiálov.

Skúška ťahom

Skúška jednoosovým ťahom je mechanická skúška, ktorá sa svojou jednoduchosťou zaradila medzi základné mechanické skúšky. Už v roku 1638 Galileo Galilei zisťoval hmotnosť, ktorú udržia prúty, pričom postupne pridával na prúty závažia až do ich porušenia. Získané výsledky zaťaženia vztiahol na prierez a zistil, že odolnosť prútov je priamo úmerná ploche prierezu, čím získal napätie, ktoré v súčasnosti označujeme ako medzu pevnosti. Aj keď zariadenia určené pre skúšku ťahom prešli značným vývojom, princíp ostáva rovnaký. Schéma zariadenia pre skúšku ťahom je znázornená na Obr. 6 a pozostáva z nasledovných základných častí:

- a) rám zariadenia prenáša zaťažujúcu silu zo zaťažovacieho zariadenia na skúšobnú tyč
- b) zaťažovacie zariadenie vyvoláva zaťaženie posuvom traverzy, čím sa deformuje skúšobná tyč
- c) zariadenie na meranie a záznam sily
- d) zariadenie na meranie a záznam deformácie

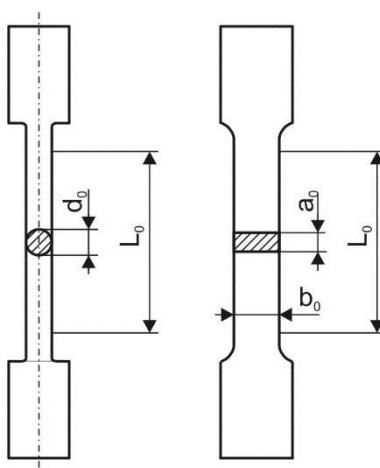


Obr. 6 Zjednodušená schéma zariadenia pre ťahovú skúšku.

Aby bolo možné definovať napäťové a deformačné charakteristiky materiálu statickou skúškou ťahom, je potrebné materiál tvarovo pripraviť. Tvar, rozmery a príprava skúšobných tyčí sa zhotovujú podľa normy STN EN ISO 6892-1. V zásade rozdeľujeme skúšobné tyče na krátke a dlhé, pričom oba môžu mať buď štvorcový, obdĺžnikový alebo kruhový prierez, tak ako je to zaznamenané v Tab. 1 a Obr. 7.

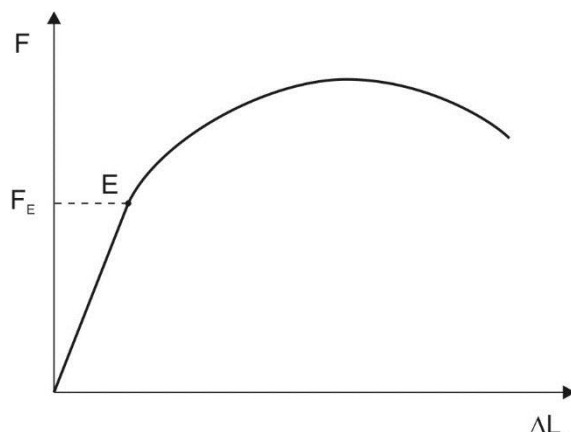
Tab. 1 Rozmery skúšobných tyčí pre skúšku ťahom

Skúšobná tyč	Meraná dĺžka		Označenie ťažnosti
	Pre kruhový prierez	Pre štvorcový, obdĺžnikový, prípadne iný prierez	
Krátka	$L_0 = 5d_0$	$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$	A_5
Dlhá	$L_0 = 10d_0$	$L_0 = 11,3\sqrt{S_0}$	A_{10}



Obr. 7 Skúšobná tyč pre statickú skúšku ťahom a) s kruhovým prierezom, b) s obdĺžnikovým prierezom.

Samotná statická skúška ťahom prebieha tak, že pripravená skúšobná tyč sa upne do čelustí trhacieho stroja, pričom je dôležité, aby os skúšobnej tyče bola v osi pôsobenia zaťažovacej sily. Definovanou rýchlosťou a plynulým posuvom traverzy sa skúšobná tyč zaťažuje a zároveň deformuje, zvyčajne až do porušenia. Základným výsledkom mechanickej skúšky ťahom je zaznamenaný graf závislosti zaťažujúcej sily F od predĺženia ΔL , ktorý je znázornený na Obr. 8.



Obr. 8 Záznam zo statickej skúšky ťahom.

V takomto zázname je možné pozorovať, že od začiatku zaťažovania dochádza k lineárnemu rastu zaťažovacej sily F v závislosti na predĺžení ΔL až po bod E, pričom lineárna závislosť odpovedá pružnej (vratnej) deformácii materiálu. Po prekročení zaťažovacej sily F_E danej bodom E dochádza k plastickej (nevratnej) deformácii materiálu, čo znamená, že sila F_E predstavuje silu, ktorej prekročením sa začne skúmaný materiál plasticke deformovať. Sila F_E vzťahnutá na prierez skúšobnej tyče S_0 je napätie nazývané medza pružnosti.

- ❖ **Medza pružnosti** je najvyššie napätie, pri ktorom ešte nevzniká plasticá deformácia.

$$R_E = \frac{F_E}{S_0}$$

Kedže v reálnych záznamoch z ťahovej skúšky je veľmi zložitý zistiť bod, v ktorom dochádza k počiatku plastickej deformácie, zaviedla sa *konvenčná medza pružnosti*.

- ❖ **Konvenčná (zmluvná) medza pružnosti** je napätie, ktoré spôsobí trvalú deformáciu o veľkosti 0,005 % z meranej dĺžky L_0 .

$$R_{p0,005} = \frac{F_{p0,005}}{S_0}$$

Konvenčná (zmluvná) medza pružnosti sa stanovuje zo záznamu z ťahovej skúšky tak, že sa vynesie rovnobežná čiara s lineárnou časťou záznamu vo vzdialenosti 0,005 % L_0 a v mieste, kde rovnobežka pretne záznam z ťahovej skúšky sa odčíta sila $F_{p0,005}$ a podľa vzťahu sa vypočíta konvenčná medza pružnosti.

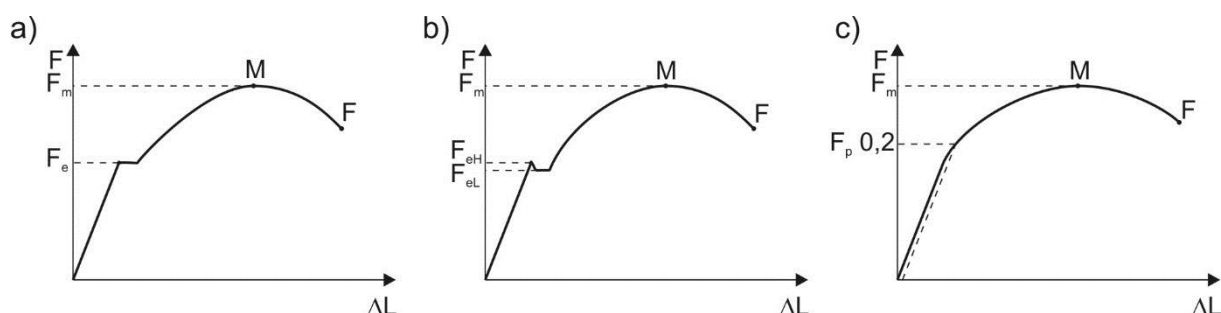
Ďalším a technicky častejšie používaným kritériom pre hodnotenie napätia prechodu medzi elastickou a elasto-plastickou deformáciou je *medza klzu*.

- ❖ **Medza klzu** je najmenšie napätie, pri ktorom začína výrazná plastická deformácia.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

V princípe môžeme materiály rozdeliť podľa záznamu z ťahových skúšok do skupín:

- s výraznou medzou klzu (Obr. 9 a) a b))
- s nevýraznou medzou klzu (Obr. 9 c))



Obr. 9 Záznam zo skúšky ťahom materiálu a) s výraznou medzou klzu, b) s výraznou medzou klzu vykazujúcou maximum a minimum a c) s nevýraznou medzou klzu.

V prípade výraznej medze klzu, takej aká je znázornená na Obr. 9 c), sa určuje sila na medzi klzu za pružnou oblasťou krivky v plató oblasti. Ak sa v zázname vyskytuje výrazná medza klzu s maximom a minimom (Obr. 9 b)), tak sa určuje **horná medza klzu**:

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}$$

a **dolná medza sklzu**:

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$

V zázname z ťahovej skúšky s nevýraznou medzou klzu je ťažké určiť kedy sa začína materiál plasticky deformovať, preto sa určuje *konvenčná medza klzu* obdobne, ako už vyššie spomínaná konvenčná medza pružnosti, ale pri väčšej hodnote plastickej deformácie.

- ❖ **Konvenčná medza klzu** je napätie, ktoré spôsobí trvalú deformáciu veľkosti 0,2 % z meranej dĺžky L_0 .

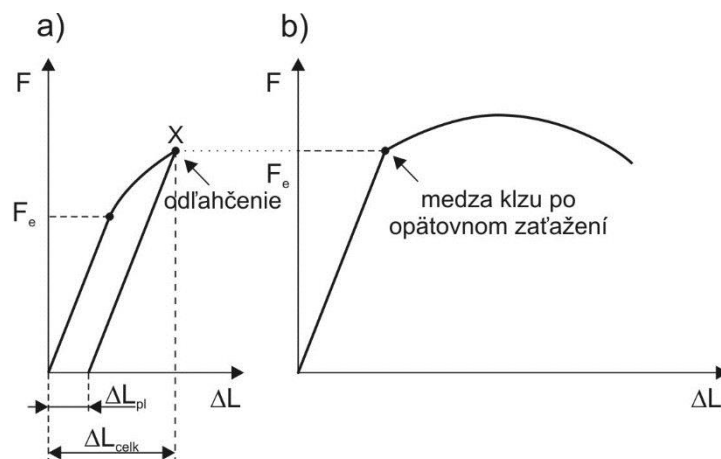
$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$$

Doteraz boli popísané napätia, ktoré charakterizovali začiatok plastickej deformácie alebo koniec výlučne elastickej deformácie. Preto z diagramu ťahovej skúšky (napr. Obr. 9 c)) je zrejmé, že po prekročení medze klzu $R_{p0,2}$ je potrebné zvyšovať zaťaženie potrebné pre plasticnú deformáciu, čomu odpovedá nárast sily počas deformácie od medze klzu až po bod M. Pozdĺž tejto krivky dochádza k rovnomernej plastickej deformácii v celom objeme skúšobnej tyče. Po prekročení maxima (bod M) dochádza k znižovaniu meranej sily v závislosti od predĺženia až po lom (bod F), pretože deformácia sa lokalizuje do tzv. krčku a neprebíha homogénne v celom objeme. Bod M charakterizuje pevnosť materiálu a vyjadruje sa napätím nazývaným *medza pevnosti*:

- ❖ **Medza pevnosti** je napätie odpovedajúce najväčšiemu zaťaženiu F_m , ktoré predchádza porušeniu skúšobnej tyče.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Okrem napätových charakteristík (R_E , R_e , $R_{p0,2}$, $R_{p0,005}$ a R_m) sa tiež určujú deformačné charakteristiky materiálu. Ako už bolo vyššie spomenuté, počas zaťaženia v oblasti pružnej deformácie sa po uvoľnení skúšobné teleso vracia do pôvodného rozmeru. To sa v diagrame z ťahovej skúšky zaznamená ako návrat do nulového bodu súradníc po tej istej čiare. Podobne môžeme zaznamenať pružnú deformáciu po odľahčení skúšobného telesa, ktoré bolo zaťažené v elasto-plastickej oblasti. V grafe na Obr. 10 je zaznamenané zaťažovanie do oblasti plastickej deformácie do bodu X, kde nasleduje odľahčenie skúšobnej tyče, čo sa prejavuje vykreslením rovnobežnej čiary s elasticou oblasťou, dochádza k uvoľneniu elastickej deformácie. Ak skúšobnú tyč opätovne zaťažíme, tak jej medza klzu bude pri sile, ktorá odpovedá bodu X (bod, v ktorom sme skúšobnú tyč odľahčili), čiže plastická deformácia skúšobného telesa začne prebiehať pri vyššom napätí z dôvodu deformačného spevnenia materiálu. V priebehu lomu, keď sa skúšobná tyč roztrhne, dochádza k uvoľneniu napätia a súčasne odpruženiu častí skúšobnej tyče. Preto zo záznamu z ťahovej skúšky vieme určiť aká bola veľká celková deformácia (ΔL_{celk}), pružná (ΔL_{el}) a tiež aj plastická (ΔL_{pl}) deformácia v momente pretrhnutia. Z toho vyplýva, že dĺžka skúšobnej tyče po roztrhnutí je $L_u = L_0 + \Delta L_{pl}$. Deformačné charakteristiky určujú schopnosť materiálu sa plasticky deformovať a ako základné kritériá stanovujeme zo skúšky ťahom *ťažnosť a kontrakciu*.



Obr. 10 Záznam zo skúšky ťahom: a) prerušenie skúšky a odľahčenie skúšobného telesa, b) opätovné zaťaženie telesa.

❖ **Ťažnosť** je pomerné pozdĺžne predĺženie skúšobnej tyče po roztrhnutí.

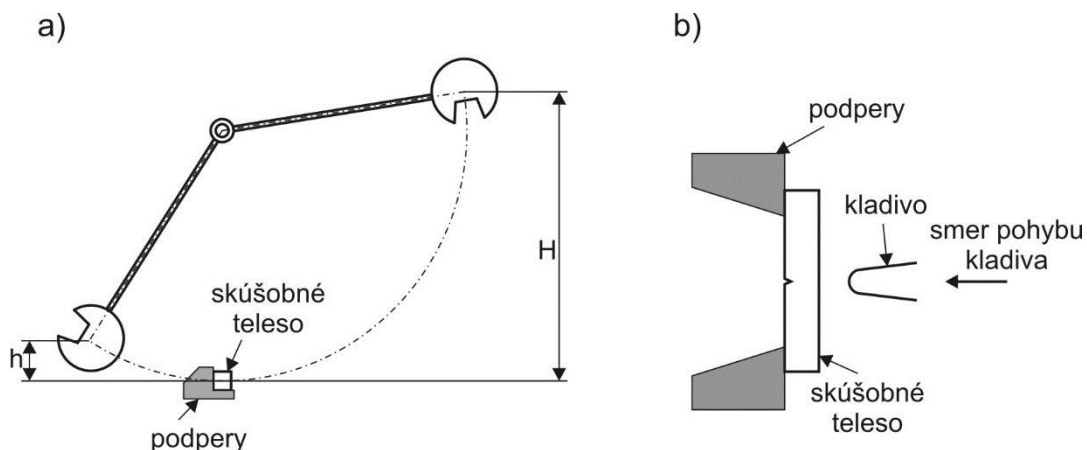
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100$$

❖ **Kontrakcia** je pomerné priečne zúženie skúšobnej tyče po roztrhnutí.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100$$

Skúška rázom v ohybe

Základné mechanické vlastnosti získané zo skúšky ťahom neodpovedajú na odolnosť materiálu proti krehkému porušeniu počas dynamického zaťaženia. Krehké porušenie materiálu vzniká pri nominálnom zaťažení nižšom ako medza klzu, čiže nedôjde k plastickej deformácii a výskyt krehkého porušenia materiálov v reálnych podmienkach použitia má katastrofálne následky. Preto G. Charpy navrhol skúšku rázom v ohybe, ktorá stanovuje húževnatosť materiálu pri rázovom, resp. dynamickom ohybe.



Obr. 11 Princíp skúšky rázom v ohybe: a) Charpyho kladivo, b) uloženie skúšobného telesa.

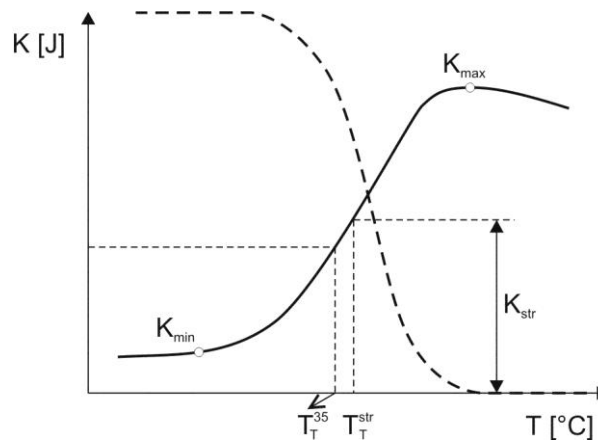
Princíp skúšky je založený na dynamickom trojbodovom ohybe ako je to znázornené na Obr. 11. Skúšobné teliesko je uložené na podperách a na stranu oproti vrubu pôsobí zaťaženie (F). Veľkosť zaťaženia je zabezpečená pádom kladiva s tiažou F_G , ktoré je spustené z definovanej výšky H a teda jeho kinetická energia je v najnižšej polohe padajúceho kladiva rovná počiatočnej potenciálnej energii $W_k = F_G \cdot H$. Pri náraze sa časť kinetickej energie spotrebuje na deformačnú prácu skúšobného telieska a zvyšok umožní výkmit kladiva do výšky h . Čím viac kinetickej energie sa spotrebuje na deformáciu telesa, tým menšie bude vychýlenie kladiva do výšky h a teda väčšia hodnota húževnatosti materiálu K :

$$K = W_p - W_p' = F_G(H - h)$$

K je práca spotrebovaná na plastickú deformáciu v objeme materiálu.

Rázová skúška v ohybe hodnotí odolnosť materiálu voči krehkému porušeniu pomocou tranzitnej (prechodovej) krivky, pričom tranzitná teplota je kritérium, ktoré určuje prechod medzi húževnatým a krehkým stavom materiálu. V závislosti na teplote sa vytvorí séria meraní, ktorej výsledok je znázornený na Obr. 12 a tranzitná teplota sa stanoví podľa nasledovných možností:

- tranzitná teplota odpovedá strednej hodnote húževnatosti K_{str}
- tranzitná teplota odpovedá dohodnutej hodnote húževnatosti, napr. $K = 35 \text{ J}$



Obr. 12 Určenie tranzitnej teploty T_T z hodnôt vrubovej húževnatosti a podielu krehkého lomu.

Skúšky tvrdosti

Tvrdosť materiálu je odvodená mechanická vlastnosť, ktorú možno definovať nasledovne:

- ❖ **Tvrdosť** je odpor materiálu proti deformácii jeho povrchu pôsobením geometricky definovaného telesa.

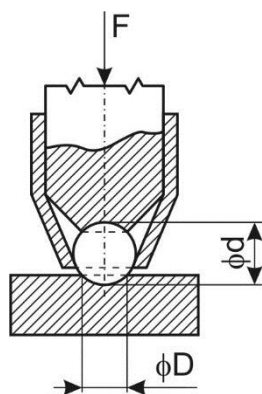
Skúšky tvrdosti sú v praxi veľmi rozšírené, pretože môžu byť použité pre súčiastky, z ktorých už nie je možné vyrobiť skúšobné teleso. Materiál sa pri skúške neporuší a ovplyvní malý objem materiálu od povrchu. Taktiež pri niektorých konštrukčných riešeniach je potrebné zabezpečiť, aby povrch súčiastky mal väčšiu odolnosť voči deformácii ako jadro súčiastky a metódy merania tvrdosti sú svojou jednoduchosťou predurčené pre tento účel stanovenia pevnosti.

Podľa princípu skúšania tvrdosti môžeme metódy merania tvrdosti rozdeliť na *vtlačacie*, *vrypové*, *odrazové* a *kyvadlové*. Našou úlohou bude vyskúšať použitie nasledovných rozpísaných vtlačacích metód.

Skúška tvrdosti podľa Brinella

- ❖ Pri skúške tvrdosti podľa *Brinella* (Obr. 13) je vtlačaná **gulôčka** s priemerom d z **kalenej ocele** do povrchu materiálu silou F . Zo vzniknutého odtlačku s plochou S a priemerom D sa určí tvrdosť materiálu:

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{0,102.2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$



Obr. 13 Schéma skúšky tvrdosti podľa Brinella.

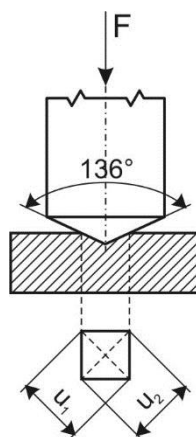
Priemer použitej guľôčky sa stanovuje podľa hrúbky meraného materiálu, pričom hrúbka materiálu musí byť minimálne desaťnásobok hĺbky vtlačku. Používané priemery guľôčky sú 1 mm; 2,5 mm; 5 mm a 10 mm. Doba zaťaženia silou F závisí od materiálu, pričom u ocelí sa volí 10 až 15 s a u zliatin neželezných kovov 10 až 180 s.

Skúška tvrdosti podľa Vickersa

- ❖ Pri skúške tvrdosti podľa *Vickersa* (Obr. 14) je vtlačaný **diamantový štvorboký ihlan s vrcholovým uhlom 136°** do povrchu materiálu silou F . Zo vzniknutého odtlačku s plochou S a uhlopriečkami u_1 a u_2 sa určí tvrdosť materiálu:

$$HV = \frac{F}{S} = 0,189 \frac{F}{u^2}$$

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2}$$



Obr. 14 Schéma skúšky tvrdosti podľa Vickersa.

Hrúbka vzorky musí byť min. 1,5x väčšia ako uhlopriečka vtlačku. Dĺžka výdržu na zaťažovacej sile sa volí podľa druhu materiálu, podobne ako u Brinellovej skúšky. Ku značke tvrdosti podľa Vickersa HV sa pripoja podmienky skúšky: HV *zaťažujúca sila v kp/výdrž na zaťažovacej sile*. Napríklad: HV 10/30 = 200 (1 kp = 9,8 N); v prípade ak $F = 294 \text{ N}$ a výdrž 10 s označí sa HV = 200.

Skúška tvrdosti podľa Rockwella

- ❖ Pri skúške tvrdosti podľa *Rockwella* je vtlačaný **diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom 120° (HRC alebo HRA)** do povrchu materiálu. Tvrdosť sa určí z rozdielu medzi zmluvnou hĺbkou vtlačku a hĺbkou trvalého vtlačku.

Skúšobná vzorka sa položí na stôl. Otáčaním valca priblížime vzorku k hrotu. Po kontakte hrotu so vzorkou sa hrot zaťaží predbežným zaťažením F_0 (98 N pre HRA aj HRC) a vnikne do hĺbky h_1 . Tým sa odstráni vplyv povrchovej vrstvy a hĺbkomer na stupnici prístroja sa nastaví do východiskovej polohy. V ďalšom sa hrot prístroja zaťaží prídavným zaťažením F_1 (pre HRC $F_1 = 1373 \text{ N}$ a HRA $F_1 = 490 \text{ N}$), takže celkové zaťaženie bude $F = F_0 + F_1$ a hrot vnikne do hĺbky h_2 . Zaťaženie má byť plynulé a má sa dosiahnuť za 2-8 s. Po ustálení ručičky tvrdomeru sa odľahčí o zaťaženie F_1 , predzaťaženie F_0 ostáva pôsobiť naďalej. Tým sa hĺbka h_2 zmenší o elastickú deformáciu a ostane v plastickej deformovanom vpichu o hĺbke h_3 . Tvrdosť HRC alebo HRA bude daná rozdielom základnej hĺbky (0,2 mm) a hĺbky trvalého vpichu h_3 . Základná hĺbka 0,2 mm je rozdelená na 100 dielikov a tvrdosť sa odčíta priamo zo stupnice prístroja. Hodnotu tvrdosti možno vyjadriť ako $\text{HRC} = 100 - h_3$ alebo $\text{HRA} = 100 - h_3$.

Úlohy cvičenia

1. Vykonaajte skúšku ťahom na dodanom materiáli a vyhodnoťte napäťové a deformačné charakteristiky.
2. Stanovte tranzitnú teplotu materiálu z nameraných hodnôt vrubovej húževnatosti..
3. Odôvodnite vhodnú metódu merania tvrdosti pre vybrané materiáli a odmerajte tvrdosť týchto materiálov.

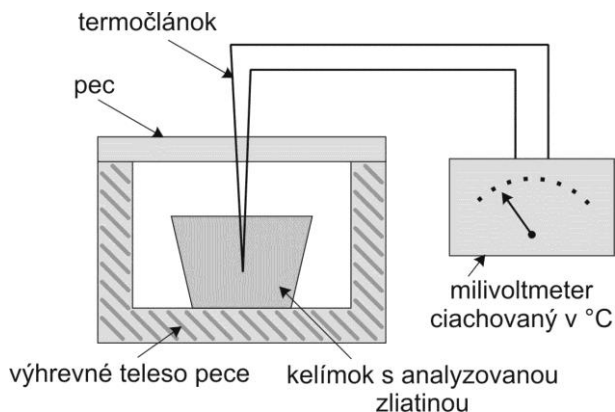
TERMICKÁ ANALÝZA, KONŠTRUKCIA ROVNOVÁŽNYCH DIAGRAMOV

Cieľ cvičenia

Zostrojiť rovnovážny binárny diagram z kriviek ochladzovania získaných termickou analýzou.

Termická analýza

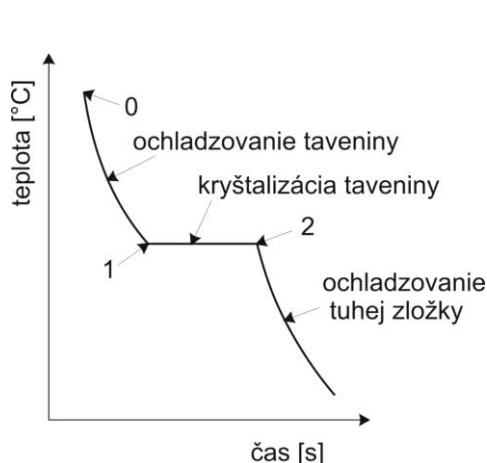
Termická analýza je jednou zo základných a jednoduchých metód pre popis fázových premien počas procesu ochladzovania, resp. ohrevu materiálu. Výsledným výstupom termickej analýzy je krivka ochladzovania, resp. krivka ohrevu skúmaného materiálu. Na Obr. 15 je schematicky zobrazené zariadenie pre vykonanie termickej analýzy. Sústava je zložená z pecky, ktorej ohrev je ovládaný pomocou regulátora, skúmaného materiálu s presne definovaným chemickým zložením, ktorý je uložený v pecke v pracovnom kelímku. Teplota materiálu počas ochladzovania, resp. ohrevu je meraná termočlánkom, ktorý sa napája na milivoltmeter. Výstupom termickej analýzy je samotná krivka ochladzovania (alebo ohrevu) zaznamenaná ako závislosť teploty (T) na čase (t) ako $T = f(t)$. Zmeny na priebehu krivky ochladzovania sú prejavom fázových transformácií alebo premien v študovanej termodynamickej sústave (kryštalizácia, precipitácia, eutektická reakcia a pod.).



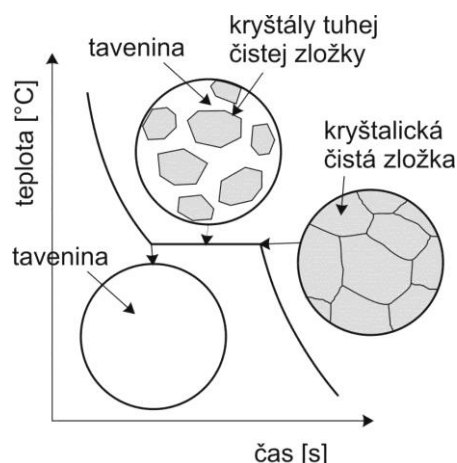
Obr. 15 Schéma zariadenia pre termickú analýzu

Na Obr. 16 je znázornená typická krivka ochladzovania pre čistú zložku, získaná termickou analýzou a zapísaná v súradnicovom systéme teplota [$^{\circ}\text{C}$] - čas [s]. Krivka ochladzovania začína v bode 0 pri teplote, kedy sa materiál nachádza v kvapalnom skupenstve, ktoré nazývame tavenina. Od bodu 0 po bod 1 dochádza k voľnému ochladzovaniu taveniny a na krivke nepozorujeme žiadne fázové premeny. Teplota v bode 1 je teplotou tuhnutia skúmanej čistej zložky a na krivke pozorujeme zastavenie poklesu meranej teploty materiálu, kým nedôjde k ukončeniu premeny skupenského

stavu kvapalného na tuhé v čase, ktorý určuje bod 2, tak ako je to štruktúrne znázornené na Obr. 17. Kryštalizácia čistej zložky prebieha pri konštantnej teplote (zádržná čiara), pretože počas procesu kryštalizácie dochádza k uvoľňovaniu skupenského tepla, ktoré nazývame latentné teplo kryštalizácie. Ďalšie ochladzovanie z teploty v bode 2 je voľným ochladzovaním tuhého skupenstva čistej zložky.



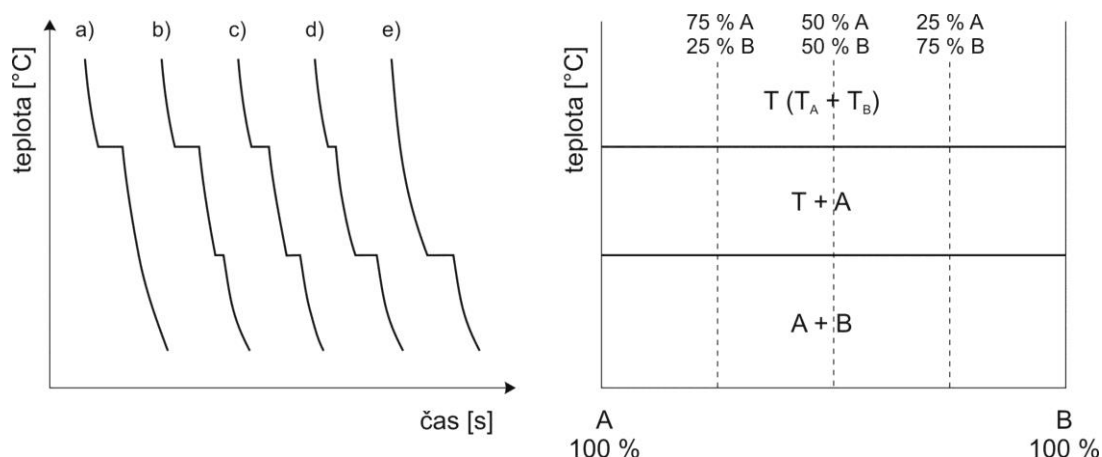
Obr. 16 Krivka ochladzovania čistej zložky



Obr. 17 Vývoj štruktúry počas kryštalizácie jednozložkovej sústavy

Konštrukcia rovnovážnych binárnych diagramov

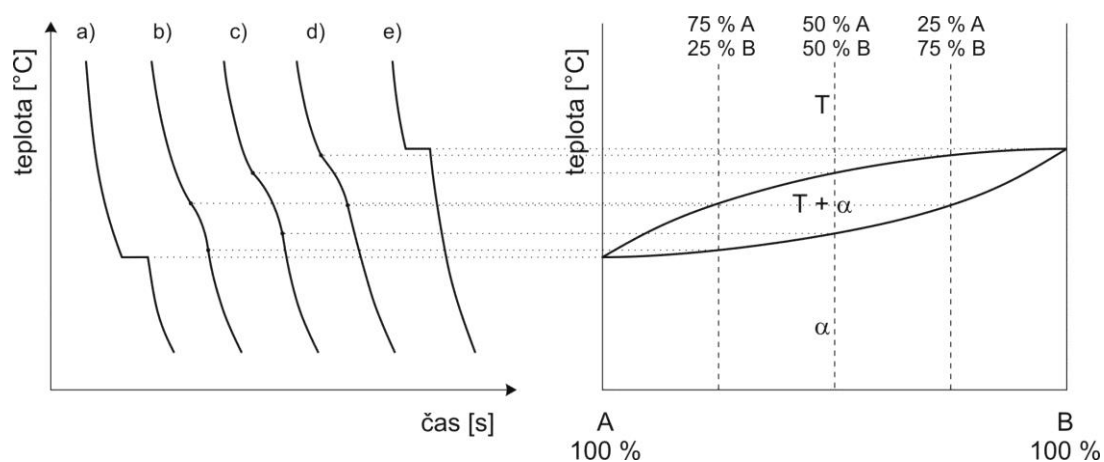
Termickou analýzou môžeme pomocou kriviek ochladzovania zostrojiť fázové diagramy binárnych (resp. ternárnych, atď.) sústav. Diagramy sa graficky zostrojujú tak, že na horizontálnej osi zapisujeme koncentráciu zložiek a na vertikálnej osi teplotu. Z kriviek ochladzovania zliatin s odstupňovanou koncentráciou a čistých zložiek sa zapisujú teploty počiatkov a koncov fázových premien do diagramu a pospájaním bodov sa získa binárny diagram. Postup zostrojenia rovnovážneho binárneho diagramu uvedieme na nasledujúcom príklade: *Rovnovážny binárny diagram s dokonalou nerozpustnosťou zložiek ako v tekutom, tak aj v tuhom skupenstve.* Keďže zložky sa navzájom nerozpúšťajú a tiež iným spôsobom medzi sebou neinteragujú, musí dôjsť k tuhnutiu zložiek pri ich vlastných teplotách tuhnutia. Na Obr. 18 sú zobrazené krivky ochladzovania s odstupňovanou koncentráciou zložiek tak, aby bolo možné binárny diagram zostrojiť. Na krivkách ochladzovania zliatin zložiek A a B (Obr. 18 b) až d)) je možné pozorovať, že dochádza k tuhnutiu najprv zložky A a neskôr zložky B, pričom na krivkách ochladzovania nie je zaznamenaná žiadna iná fázová premena. Zápisom a pospájaním týchto teplôt do súradnicového systému teplota [°C] -koncentrácia [%] dostávame rovnovážny binárny diagram ako na Obr. 18 vpravo.



Obr. 18 Krivky ochladzovania komponent a) 100 % A, b) 75 % a A 25 % B, c) 50 % A a 50 % B, d) 25 % A a 75 % B, e) 100 % B, z ktorých je vytvorený rovnovážny binárny diagram s nerozpustnosťou ako v tekutom, tak aj v tuhom skupenstve.

Rovnovážny binárny diagram s dokonalou rozpustnosťou zložiek ako v tekutom, tak aj tuhom stave. Krivky ochladzovania čistých zložiek (Obr. 19 a) a e)) ako aj ich zliatin sú zaznamenané na Obr. 19. Keďže spolu zložky vytvárajú v tuhom skupenstve tuhý roztok (podľa definície diagramu), počas kryštalizácie zliatin nedochádza k zmene skupenstva z kvapalného na tuhé pri jednej teplote, ale v intervale teplôt. Dôvodom je zmena chemického zloženia taveniny a tuhého roztoku počas tuhnutia¹. Začiatok a koniec kryštalizácie tuhého roztoku sa prejaví inflexným bodom na krivke ochladzovania. Zaznamenaním a spojením bodov teplôt začiatku (krivka likvidu) a konca (krivka solidu) tuhnutia zliatin do diagramu teplota-koncentrácia získame rovnovážny binárny diagram ako na Obr. 19 vpravo.

¹ Rozbor tejto témy je v obsahu nasledujúceho cvičenia.



Obr. 19 Krivky ochladzovania komponent a) 100 % A, b) 75 % A 25 % B, c) 50 % A a 50 % B, d) 25 % A a 75 % B, e) 100 % B, z ktorých je vytvorený rovnovážny binárny diagram s dokonalou rozpustnosťou ako v tekutom, tak aj v tuhom skupenstve.

Úlohy cvičenia

1. Nakreslite krivky ochladzovania čistých komponent a zliatin z nameraných hodnôt termickou analýzou.
2. Z kriviek ochladzovania odčítajte teploty začiatku kryštalizácie T_{ZK} a konca kryštalizácie T_{KK} a hodnoty zapíšte do tabuľky.
3. Nakreslite a popíšte rovnovážny binárny diagram komponent Sn – Zn.

	100 % Zn	75 % Zn 25 % Sn	50 % Zn 50 % Sn	25 % Zn 75 % Sn	8 % Zn 92 % Sn	100 % Sn
T_{ZK} [°C]						
T_{KK} [°C]						

ROZBOR ROVNOVÁŽNYCH BINÁRNYCH DIAGRAMOV (1. ČASŤ)

Cieľ cvičenia

Zostrojiť rovnovážne binárne diagramy podľa zadania úloh na cvičení.

Teoretická časť

Znalosť čítania rovnovážnych binárnych diagramov ponúka vytvorenie si kvalitatívneho a kvantitatívneho obrazu o materiáli v rovine fázového zloženia. Poznanie rovnovážnych binárnych diagramov nie je špeciálnym nástrojom pre vývojárov materiálov, ale zahŕňa všetky pracovné oblasti zaoberajúce sa materiálmi, teda od výrobných technológov, spracovania odpadu až po výskumníkov a vývojárov materiálov. Mnohokrát je táto skutočnosť podceňovaná, ale z rovnovážnych diagramov je možné predpovedať nielen fázovú kompozíciu systému, ale tiež aj vývoj štruktúry nerovnovážne spracovaného systému. Pochopenie rovnovážnych diagramov v takejto hĺbke však úzko súvisí s dobrým poznaním fázových transformácií. Úlohou tejto vyučovacej jednotky je pochopiť konštrukciu základných rovnovážnych binárnych diagramov, pomocou ktorých môžeme zložené (komplexné) rovnovážne binárne diagramy rozdeliť na základné. Pre popis a čítanie diagramov si vysvetlíme tri základné nástroje: *Gibbsov zákon fáz (fázové pravidlo)*, *určenie chemického zloženia fáz* a *pákové pravidlo*.

Fázové pravidlo

V termodynamickej sústave na výskyt jednotlivých fáz majú vplyv: chemické zloženie sústavy, teplota a tlak. Pomocou fázového pravidla môžeme určiť, ktoré z nezávisle premenných (koncentrácia, teplota, tlak; c , T , p) sa môžu meniť, aby sa nezmenil počet a druh existujúcich fáz v sústave. Výpočet stupňov voľnosti termodynamickej sústavy sa realizuje pomocou Gibbsovho zákona fáz (fázového pravidla), ktorý má tvar:

$$v + f = k + 2 \quad \text{alebo} \quad v = k - f + 2,$$

Kde v je počet stupňov voľnosti, k je počet komponentov a f je počet fáz. V termodynamických dejoch, ktoré budeme študovať, môžeme vziať tlak za konštantný, a preto budeme ďalej používať fázové pravidlo v tvare:

$$v + f = k + 1 \quad \text{alebo} \quad v = k - f + 1.$$

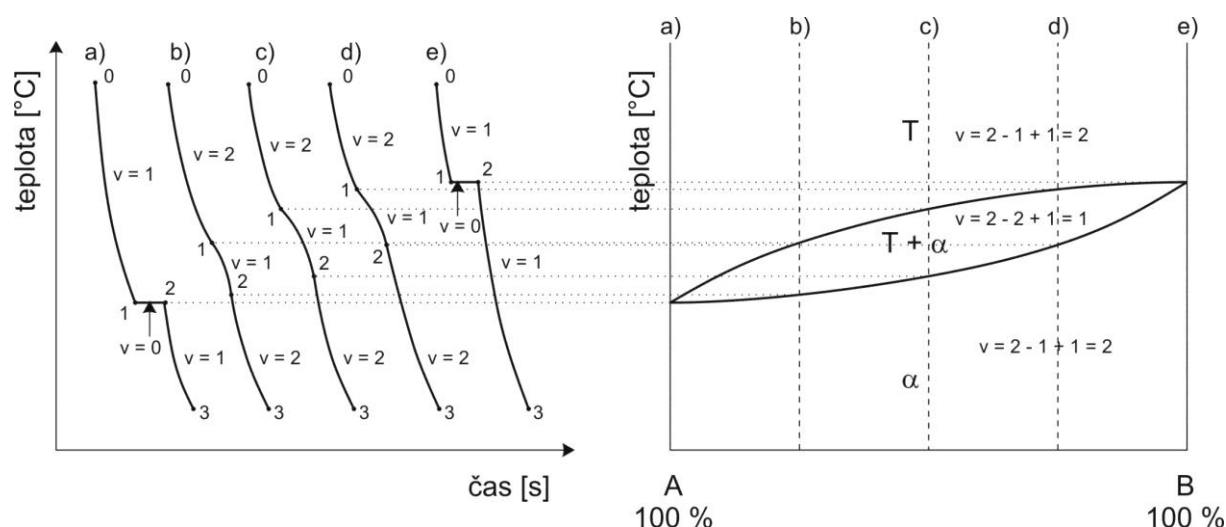
Gibbsov zákon fáz aplikujeme na jednotlivé oblasti krivky ochladzovania čistej zložky, ktorá je zobrazená na

Obr. 20. V časti krivky medzi bodmi 0 – 1 vypočítame počet stupňov voľnosti ako $v = 1 - 1 + 1 = 1$. To znamená, že môžeme meniť jednu veličinu z nezávisle premenných. Keďže tlak pri výpočtoch zanedbávame a jedná sa o jednozložkovú sústavu, tak jediná premenná, ktorú môžeme meniť, je teplota. Na krivke ochladzovania v oblasti zádržnej čiary medzi bodmi 1 – 2 pomocou fázového pravidla dostávame $v = 1 - 2 + 1 = 0$. Keďže

v tejto oblasti krivky ochladzovania sú dve fázy v rovnováhe (tavenina, tuhá čistá zložka), neexistuje nezávisle premenná veličina, ktorú môžeme zmeniť bez toho, aby sa nezmenil počet a druh fáz. Ďalšia oblasť krivky medzi bodmi 2 – 3 má počet stupňov voľnosti $v = 1$, analogicky ako pre oblasť 0 – 1.

Aplikácia fázového pravidla² neplatí len pre krivku ochladzovania čistej zložky alebo zliatiny, ale taktiež pre celé oblasti v rovnovážnom binárnom diagrame ako to je názorne vypočítané na

Obr. 20. Avšak je potrebné si uvedomiť, že do týchto oblastí nepatrí samotný čistý komponent.



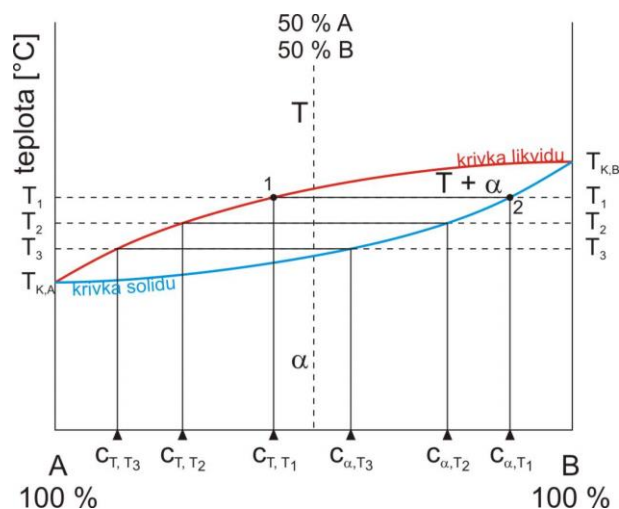
Obr. 20 Výpočet stupňov voľnosti sústavy pre oblasti kriviek ochladzovania a rovnovážneho binárneho diagramu.

Určenie chemického zloženia fáz

Na rovnovážnom binárnom diagrame s dokonalou rozpustnosťou ako v tekutom, tak aj tuhom skupenstve (Obr. 21), ktorý bol predmetom výkladu na predchádzajúcej vyučovacej jednotke, si vysvetlíme určenie chemického zloženia fáz vo viacfázovej oblasti. Rovnovážne chemické zloženie fázy koexistujúcej s inou fázou v zliatine pri určitej teplote T je dané priesečníkom izotermickej priamky danej teploty T s čiarou diagramu ohraničujúcou oblasť existencie fázy, ktorej rovnovážne chemické zloženie určujeme. V diagrame na Obr. 21 je vyznačená izoterma pri teplote T_1 v dvojfázovej oblasti koexistujúcich fáz T a α . Izoterma pretína čiaru ohraničujúcu oblasť samostatne existujúcej fázy T v bode 1, a preto chemické zloženie fázy T pri teplote T_1 je C_{T,T_1} . Chemické zloženie tuhého roztoku α je určené priesečníkom izotermy pri teplote T_1 a čiarou ohraničujúcej oblasť samostatne existujúcej fázy α v bode 2. Preto chemické

² Upozornenie: Aplikácia fázového pravidla neplatí pre popis zliatin sústavy komponentov nerozpustných ako v tekutom, tak aj tuhom skupenstve, pretože sa jedná o zmes jednozložkových sústav.

zloženie tuhého roztoku α pri teplote T_1 je c_{α,T_1} . Analogicky je možné určiť chemické zloženie fáz pri teplotách T_2 a T_3 , ako je to vyznačené na Obr. 21.



Obr. 21 Určenie chemického zloženia fáz v dvojfázovej oblasti pri teplotách T_1 , T_2 a T_3 v rovnovážnom binárnom diagrame dvoch zložiek dokonale rozpustných ako v tekutom, tak v tuhom skupenstve.

Pákové pravidlo

Pákové pravidlo slúži na určenie množstva existujúcich fáz konkrétnej zliatiny pri určenej teplote vo viacfázovej oblasti. Príklad použitia pákového pravidla je zobrazený na

Obr. 22. Pomocou izotermy pri teplote T_1 určíme celkové množstvo sústavy tak, že izotermu ohraničíme v miestach, v ktorých izoterma pretína hranice oblasti existencie samostatných fáz. Dĺžka úsečky $|\overline{ab}|$ predstavuje 100 % množstva skúmaného systému, pričom dĺžka úsečky $|\overline{ax}|$ odpovedá podielu fázy α pri teplote T_1 a dĺžka úsečky $|\overline{xb}|$ predstavuje podielu fázy T pri teplote T_1 . Množstvo jednotlivých fáz vypočítame podľa:

$$Q_{\alpha} = \frac{|\overline{ax}|}{|\overline{ab}|} \cdot 100 \quad [\%],$$

$$Q_T = \frac{|\overline{xb}|}{|\overline{ab}|} \cdot 100 \quad [\%],$$

pričom pre súčet množstiev všetkých fáz prítomných v sústave platí:

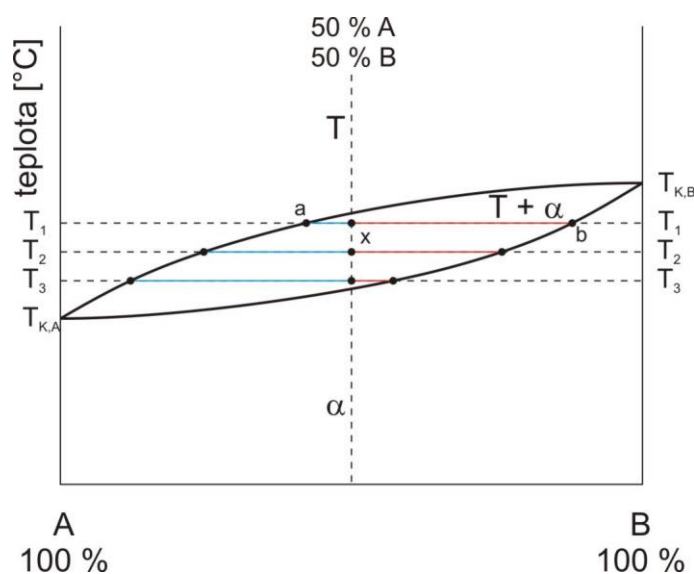
$$\sum_{i=1}^n Q_i = 100\%,$$

teda pre náš riešený prípad platí:

$$Q_{\alpha} + Q_T = 100\%$$

Analogicky môžeme vypočítať množstvo fáz aj pri teplotách T_2 a T_3 ako je to načrtnuté na

Obr. 22. Všimnite si ako sa mení dĺžka úsečky odpovedajúca množstvu taveniny v zliatine počas kryštalizácie od teploty $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3$.

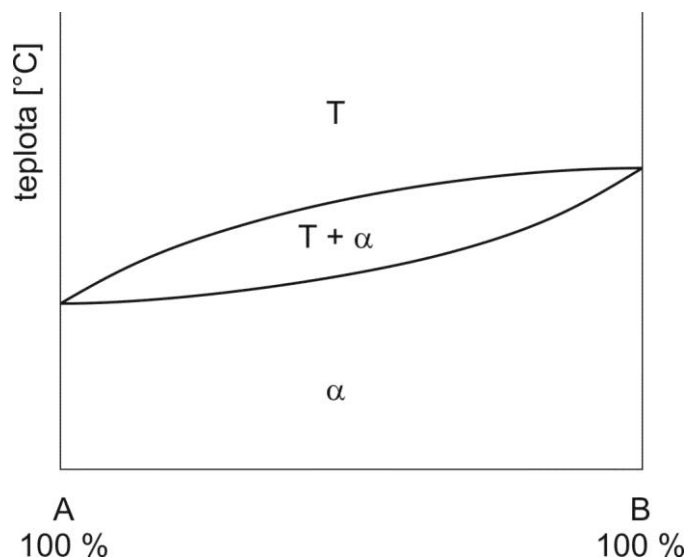


Obr. 22 Schéma použitia pákového pravidla pre určenie fáz v dvojfázovej oblasti.

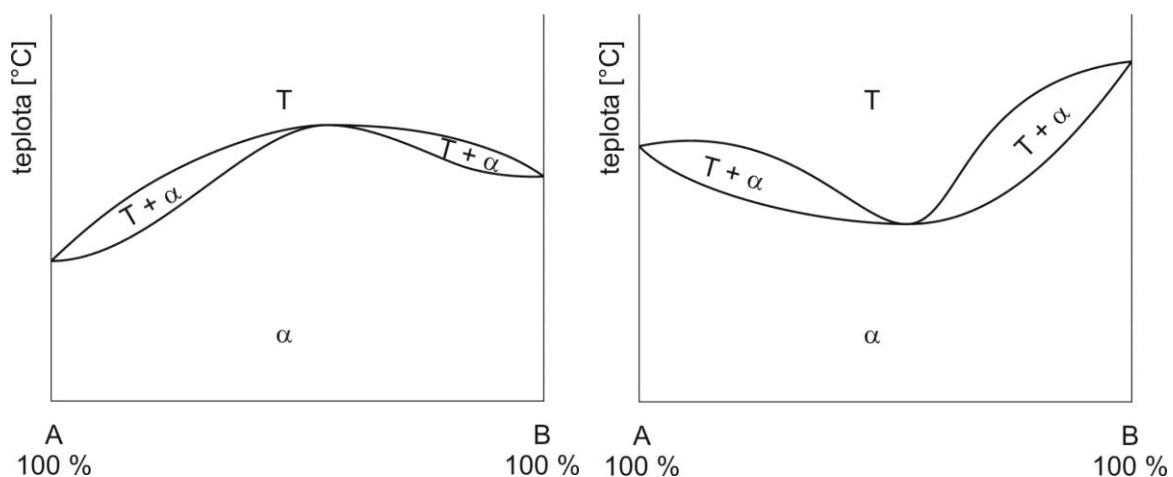
Prehľad základných rovnovážnych binárnych diagramov

Rozbor rovnovážnych binárnych diagramov je predmetom tohto cvičenia, preto v tejto časti sú uvedené len základné typy diagramov, ktoré sú základom pre pochopenie zložených diagramov. Rovnovážne binárne diagramy sú uvedené s *fázovým popisom*. Popis diagramov pomocou štruktúrnych zložiek bude obsahom, nasledujúcich prednášok a cvičení.

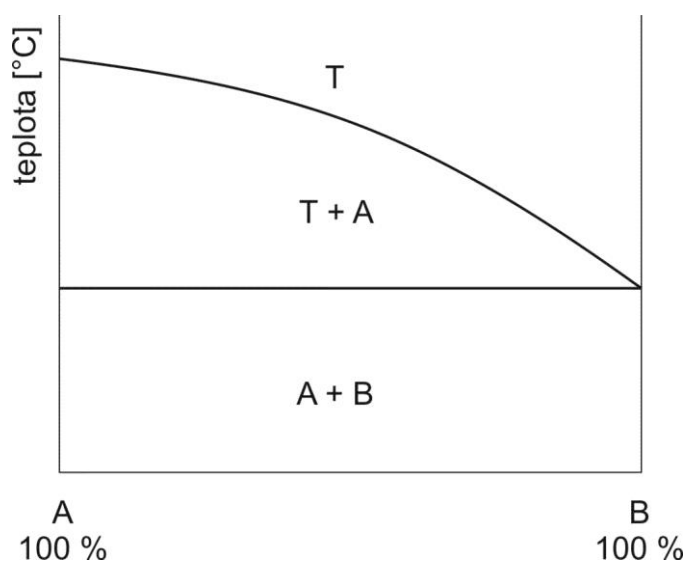
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné ako v tekutom, tak aj v tuhom skupenstve.



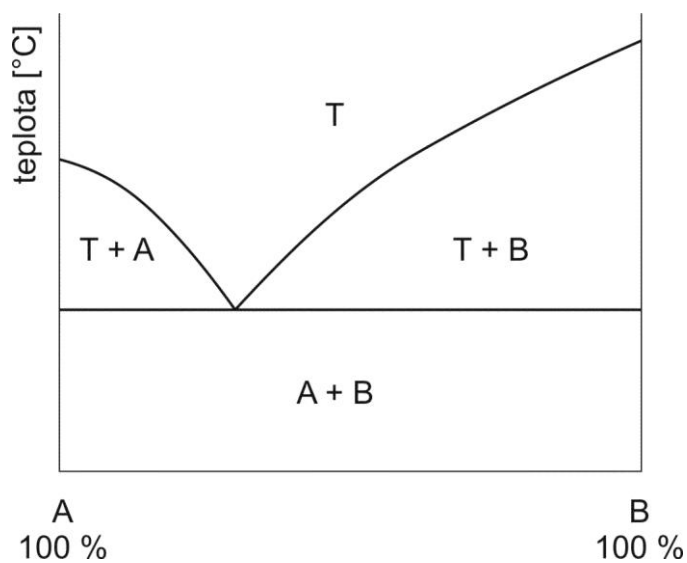
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné ako v tekutom, tak aj v tuhom skupenstve s kongruentným bodom v maxime (alebo minime) kriviek likvidus a solidus.



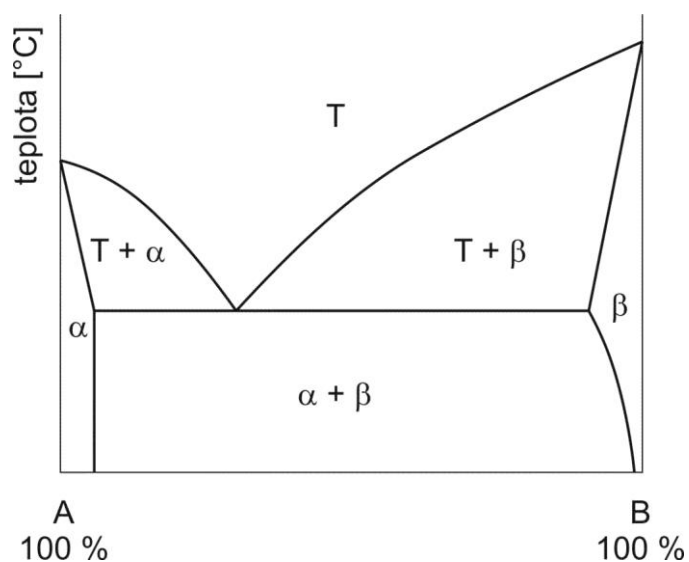
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve, nerozpustné v tuhom skupenstve a nevytvárajú eutektikum.



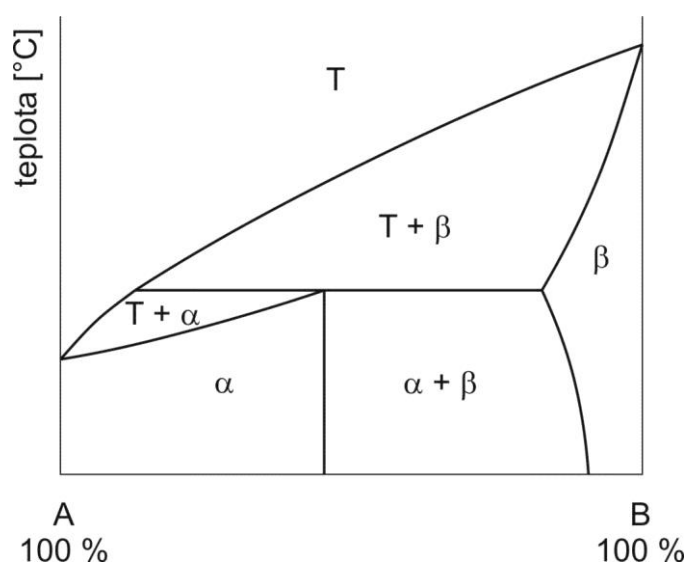
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve, nerozpustné v tuhom skupenstve a vytvárajú eutektikum.



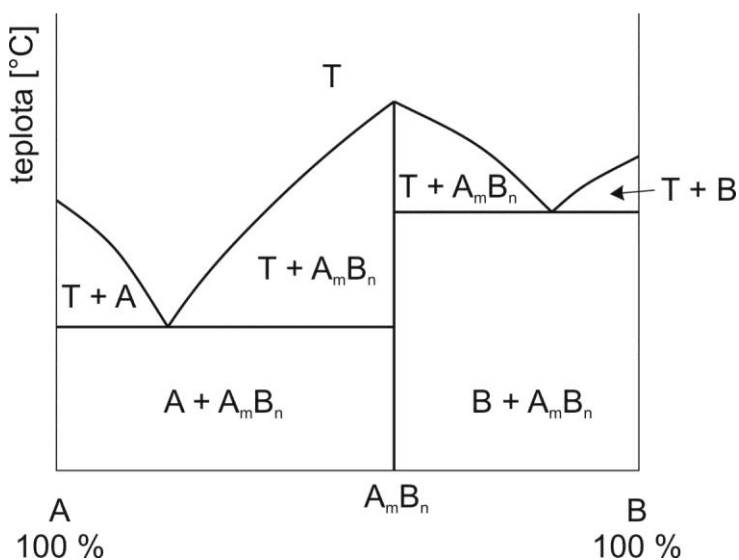
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve, obmedzene rozpustné v tuhom skupenstve a vytvárajú eutektikum. Rozpustnosť zložky B v zložke A sa s klesajúcou teplotou nemení a rozpustnosť zložky A v zložke B s klesajúcou teplotou sa znižuje.



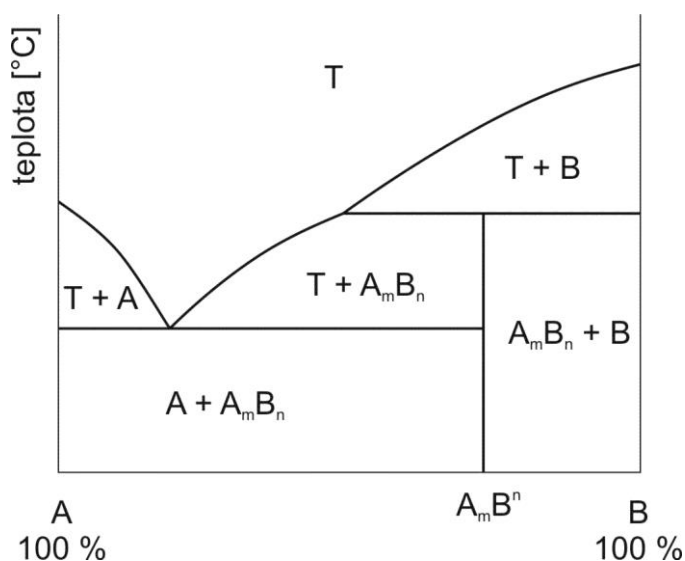
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve a obmedzene rozpustné v tuhom skupenstve s peritektickou reakciou.



Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. V tuhom skupenstve komponenty vytvárajú intermediárnu fázu s pravým bodom topenia, pričom komponenty sú navzájom nerozpustné a vytvárajú eutektiká.



Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. V tuhom skupenstve komponenty vytvárajú intermediárnu fázu s nepravým bodom topenia, pričom komponenty sú navzájom nerozpustné a komponent vytvára s intermediárnou fázou eutektikum.



Úlohy cvičenia

1. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné ako v tekutom, tak aj v tuhom skupenstve.
2. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné ako v tekutom, tak aj v tuhom skupenstve s kongruentným bodom v minime (alebo maxime) kriviek likvidu a solidu.
3. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve, nerozpustné v tuhom skupenstve a nevytvárajú eutektikum.
4. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve, nerozpustné v tuhom skupenstve a vytvárajú eutektikum.
5. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve, obmedzene rozpustné v tuhom skupenstve a vytvárajú eutektikum. (*modifikácia podľa rozpustnosti komponentov*)
6. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve a obmedzene rozpustné v tuhom skupenstve s peritektickou reakciou. (*modifikácia podľa rozpustnosti komponentov*)
7. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. V tuhom skupenstve komponenty vytvárajú intermediárnu fázu s pravým bodom topenia, pričom komponenty sú navzájom nerozpustné a vytvárajú eutektiká. (*modifikácia podľa rozpustnosti komponentov*)
8. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. V tuhom skupenstve komponenty vytvárajú intermediárnu fázu s nepravým bodom topenia, pričom komponenty sú navzájom nerozpustné a komponent vytvára s intermediárnou fázou eutektikum. (*modifikácia podľa rozpustnosti komponentov*)

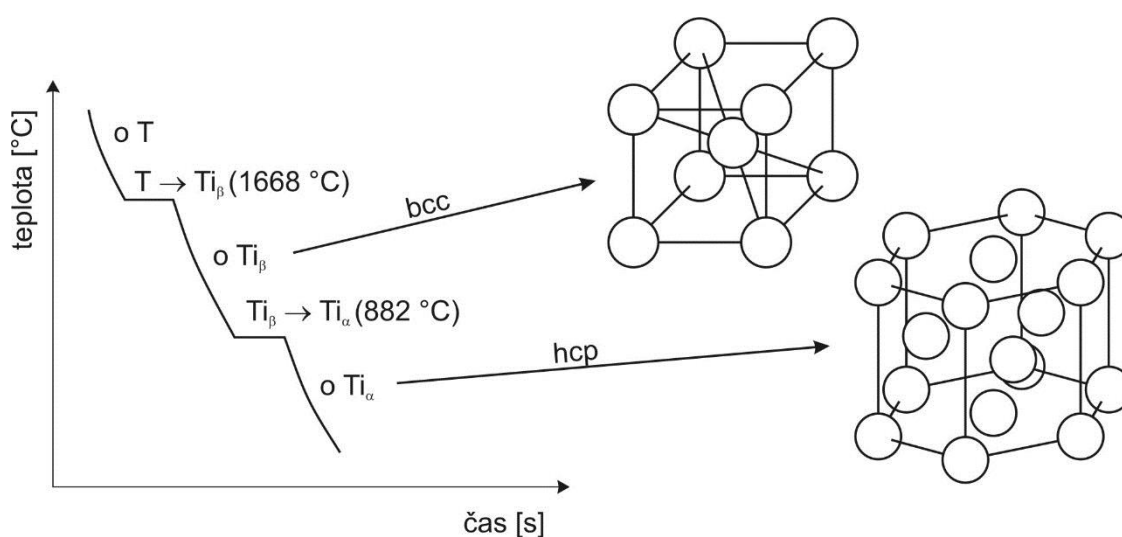
ROZBOR ROVNOVÁŽNYCH BINÁRNYCH DIAGRAMOV (2. ČASŤ)

Cieľ cvičenia

Zostrojiť rovnovážne binárne diagramy podľa zadania úloh na cvičení.

Teoretická časť

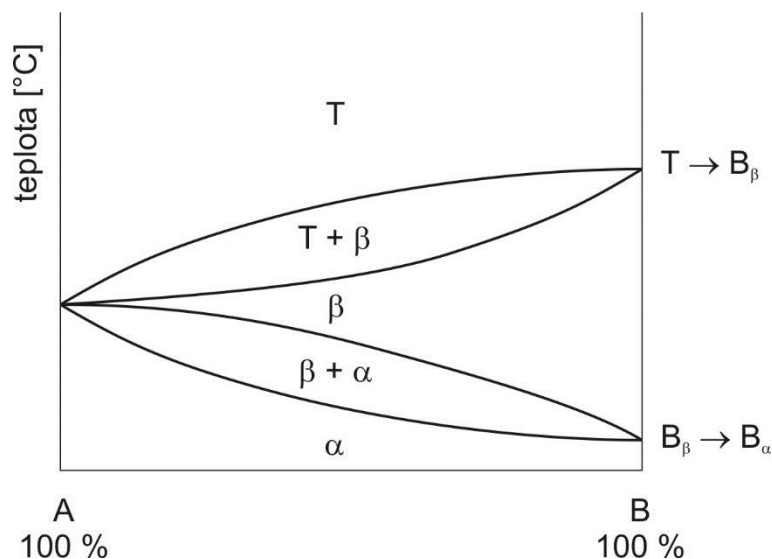
Predošlá kapitola bol venovaná rozboru základných rovnovážnych binárnych diagramov a popisu vývoja štruktúry pomocou kriviek ochladzovania vybraných zliatin. Témou tohto cvičenia bude zostrojiť zložitejšie binárne diagramy, ktoré je ale možné rozdeliť do základných binárnych diagramov. Konštrukcia zložitejších diagramov závisí na existencii alotropických modifikácií jedného alebo druhého, resp. oboch komponentov v tuhom skupenstve. Ako príklad alotropických modifikácií v reálnych komponentoch uvádzame na Obr. 23 krivku ochladzovania čistého Ti. Čistý Ti kryštalizuje pri teplote 1668 °C ako Ti_{β} s kryštalickou mriežkou kubickou priestorovo centrovanou (bcc – body centered cubic). Ti_{β} je stabilný len do teploty 882 °C, kedy prekonáva polymorfnú premenu $Ti_{\beta} \rightarrow Ti_{\alpha}$. Modifikácia Ti_{α} má kryštalickú mriežku hexanogálnu s tesným usporiadaním (hcp – hexagonal close packed) bez ďalšej polymorfnej premeny.



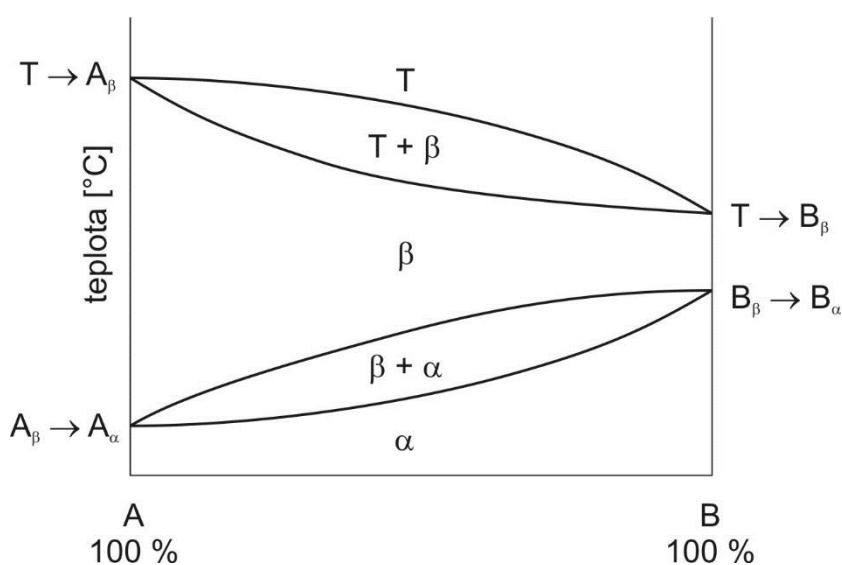
Obr. 23 Krivka ochladzovania čistého Ti.

Polymorfné premeny jednotlivých komponentov majú významný vplyv na výsledný tvar rovnovážneho binárneho diagramu. Pravidlom je, že s počtom alotropických modifikácií narastá počet fázových oblastí v binárnom diagrame. Keďže rozbor rovnovážnych binárnych diagramov je predmetom cvičenia, v ďalšej časti sú uvedené niektoré obecné príklady.

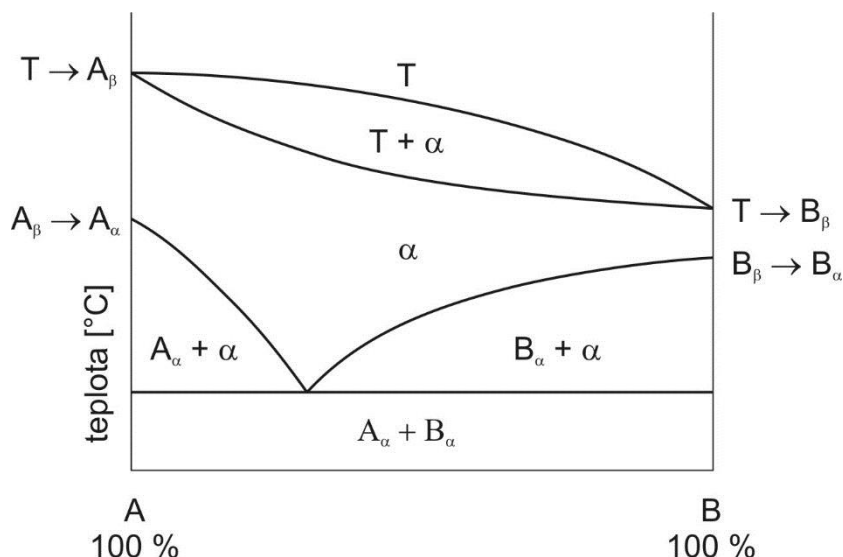
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B má dve modifikácie a komponent A má jednu modifikáciu, ktoré sú dokonale rozpustné v tuhom skupenstve.



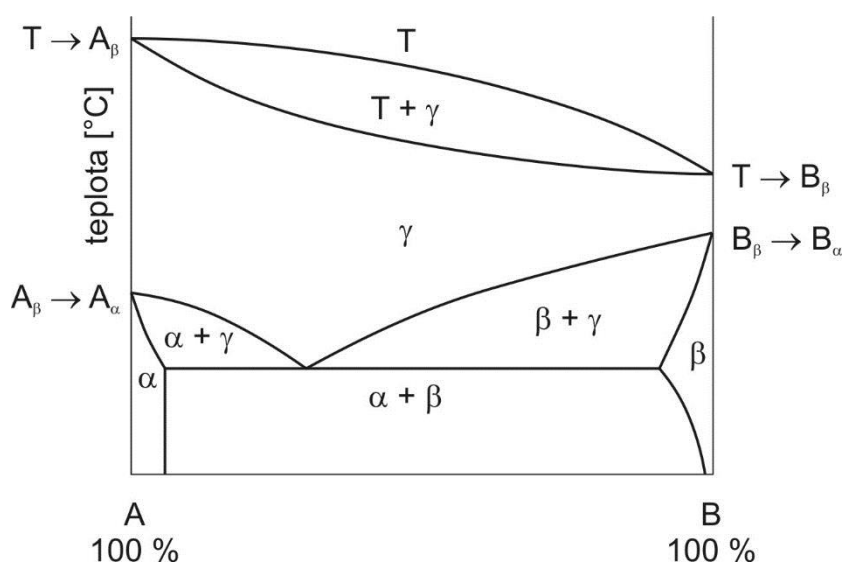
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B a komponent A majú dve modifikácie, pričom vysokoteplotné aj nízokoteplotné modifikácie sú navzájom dokonale rozpustné.



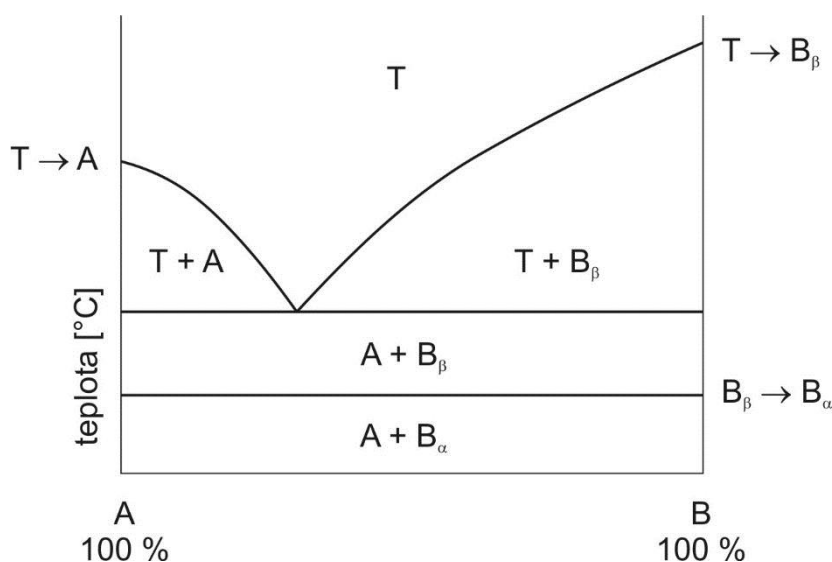
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B a komponent A majú dve modifikácie, pričom vysokoteplotné modifikácie sú navzájom dokonale rozpustné a nízкотeplotné modifikácie sú navzájom dokonale nerozpustné a vytvárajú eutektoid.



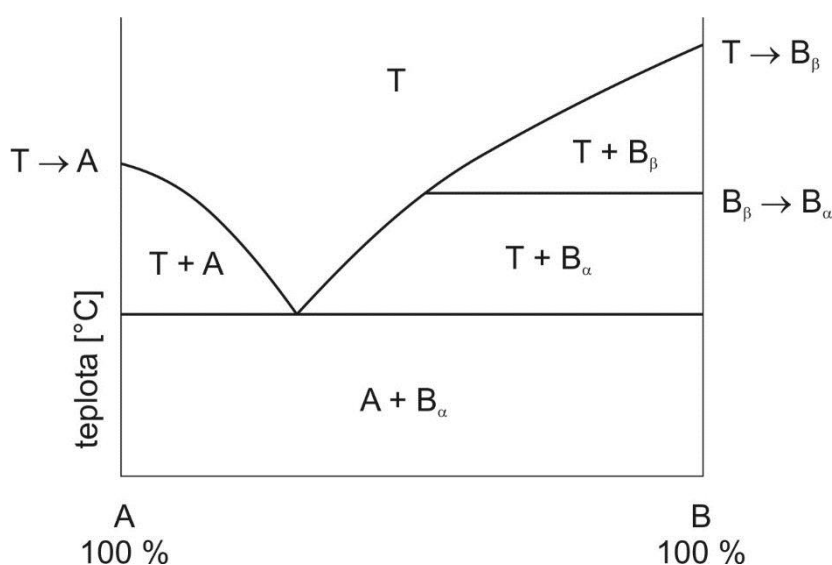
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B a komponent A majú dve modifikácie, pričom vysokoteplotné modifikácie sú navzájom dokonale rozpustné a nízкотeplotné modifikácie sú navzájom obmedzene rozpustné a vytvárajú spolu eutektoid. Rozpustnosť nízкотeplotnej komponenty B v komponente A s klesajúcou teplotou sa nemení a rozpustnosť nízкотeplotnej komponenty A v komponente B s klesajúcou teplotou klesá.



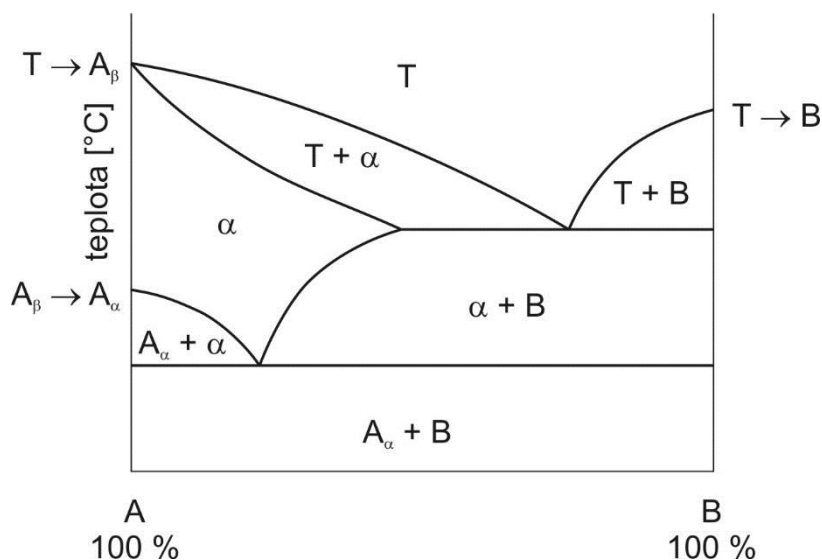
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B má dve modifikácie a komponent A má jednu modifikáciu, ktoré sú v tuhom skupenstve dokonale nerozpustné, pričom teplota polymorfnej premeny komponentu B leží pod eutektickou teplotou.



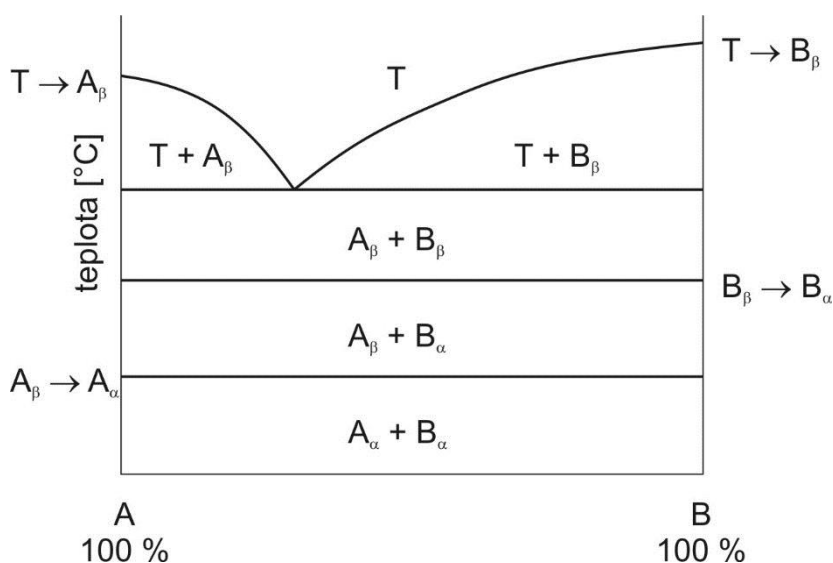
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B má dve modifikácie a komponent A má jednu modifikáciu, ktoré sú v tuhom skupenstve dokonale nerozpustné, pričom teplota polymorfnej premeny komponentu B leží nad eutektickou teplotou.



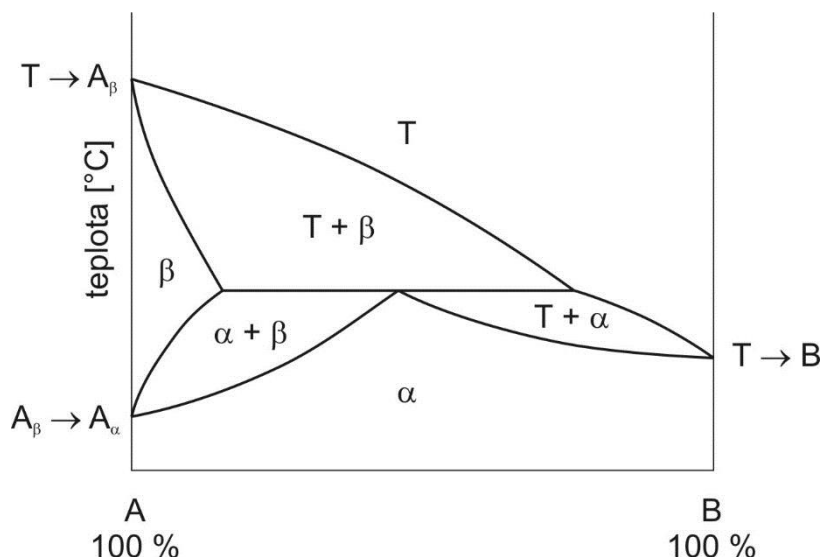
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent A má dve modifikácie a komponent B má jednu modifikáciu. Vysokoteplotná modifikácia komponentu A čiastočne rozpúšťa komponent B, pričom tuhý roztok s komponentom B vytvára eutektikum. Nízokoteplotná modifikácia komponentu A nerozpúšťa komponent B a vytvárajú spolu eutektoid.



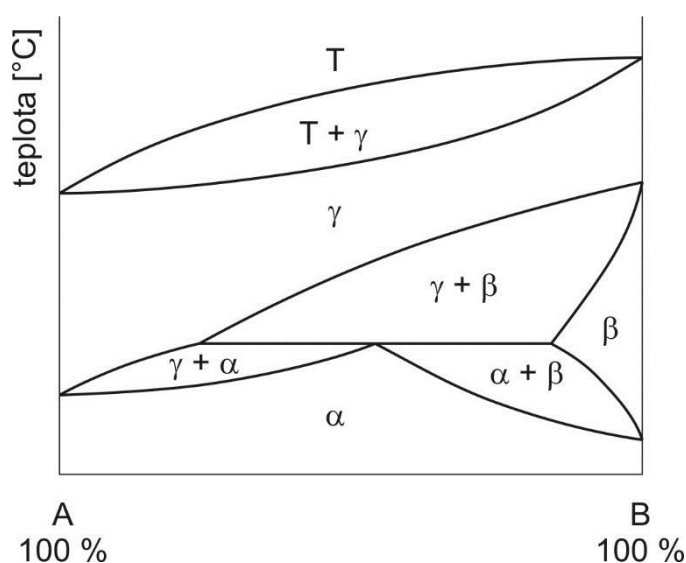
Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent A aj komponent B majú dve modifikácie, pričom vysokoteplotné ani nízokoteplotné modifikácie komponentov sa nerozpúšťajú a vytvárajú spolu eutektikum.



Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent A má dve modifikácie a komponent B má jednu modifikáciu. Vysokoteplotná modifikácia komponentu A obmedzene rozpúšťa komponent B a nízкотeplotná modifikácia komponentu A vytvára s komponentom B neobmedzený tuhý roztok peritektickou reakciou.



Rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent A má dve modifikácie a komponent B má tri modifikácie. Vysokoteplotné modifikácie komponentov A a B sú dokonale rozpustné. Stredneteplotná modifikácia komponentu B čiastočne rozpúšťa komponent A a nízкотeplotná modifikácia komponentu B vytvára s nízкотeplotnou modifikáciou komponentu A neobmedzený tuhý roztok peritektoidnou reakciou.



Úlohy cvičenia

1. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B má dve modifikácie a komponent A má jednu modifikáciu, ktoré sú dokonale rozpustné v tuhom skupenstve.
2. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B a komponent A majú dve modifikácie, pričom vysokoteplotné aj nízokoteplotné modifikácie sú navzájom dokonale rozpustné.
3. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B a komponent A majú dve modifikácie, pričom vysokoteplotné modifikácie sú navzájom dokonale rozpustné a nízokoteplotné modifikácie sú navzájom dokonale nerozpustné a vytvárajú spolu eutektoid.
4. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B má dve modifikácie a komponent A má jednu modifikáciu, ktoré sú v tuhom skupenstve dokonale nerozpustné, pričom teplota polymorfnej premeny komponentu B leží pod eutektickou teplotou.
5. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent B má dve modifikácie a komponent A má jednu modifikáciu, ktoré sú v tuhom skupenstve dokonale nerozpustné, pričom teplota polymorfnej premeny komponentu B leží nad eutektickou teplotou.
6. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent A má dve modifikácie a komponent B má jednu modifikáciu. Vysokoteplotná modifikácia komponentu A čiastočne rozpúšťa komponent B, pričom tuhý roztok s komponentom B vytvára eutektikum. Nízokoteplotná modifikácia komponentu A nerozpúšťa komponent B a vytvárajú spolu eutektoid.
7. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent A má dve modifikácie a komponent B má jednu modifikáciu. Vysokoteplotná modifikácia komponentu A obmedzene rozpúšťa komponent B a nízokoteplotná modifikácia komponentu A vytvára s komponentom B neobmedzený tuhý roztok peritektickou reakciou.
8. Zostrojte rovnovážny binárny diagram dvoch komponentov, ktoré sú dokonale rozpustné v tekutom skupenstve. Komponent A má dve modifikácie a komponent B má tri modifikácie. Vysokoteplotné modifikácie komponentov A a B sú dokonale rozpustné. Strednetepelná modifikácia komponentu B čiastočne rozpúšťa komponent A a nízokoteplotná modifikácia komponentu B vytvára s nízokoteplotnou modifikáciou komponentu A neobmedzený tuhý roztok peritektoidnou reakciou.

ROZBOR METASTABILNÉHO ROVNOVÁŽNEHO DIAGRAMU Fe – Fe₃C

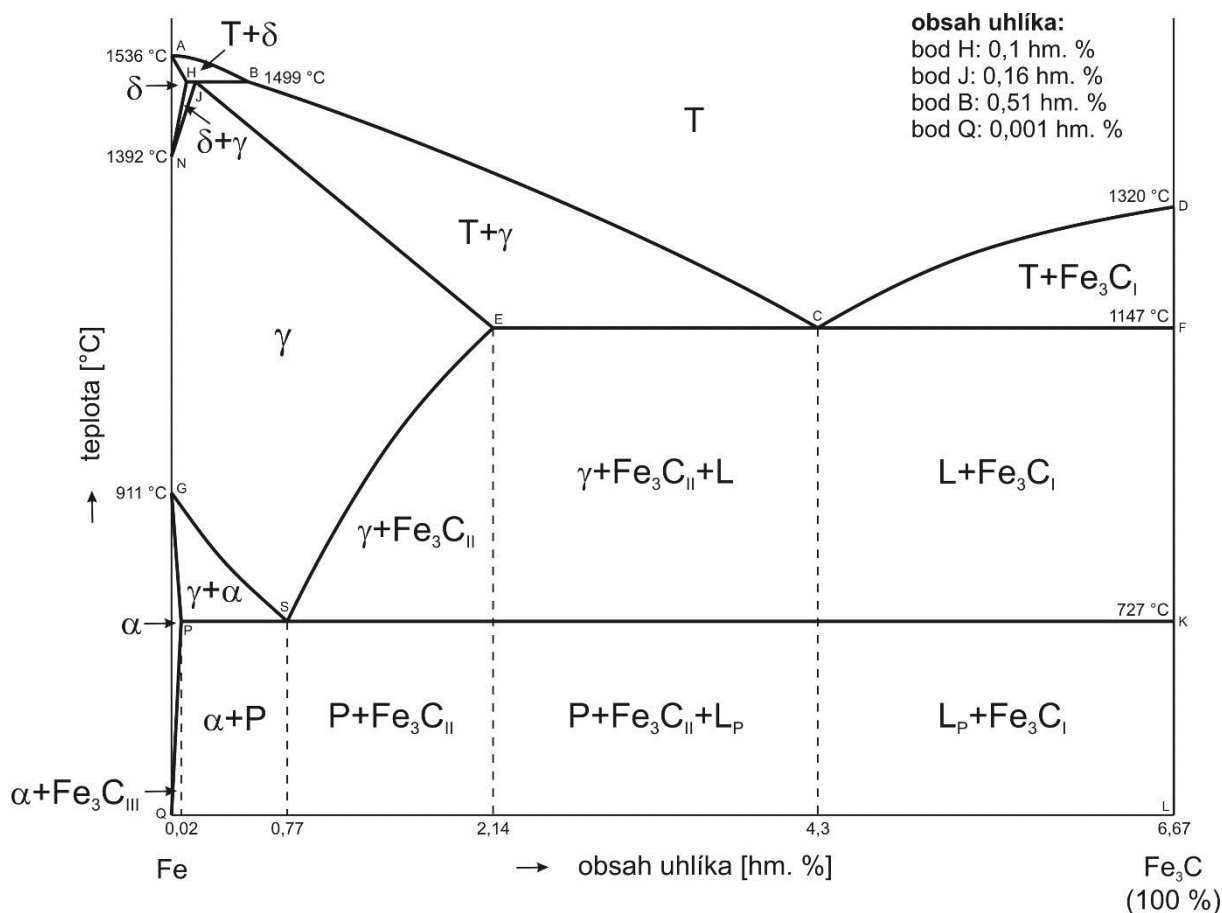
Cieľ cvičenia

Zostrojiť krivky ochladzovania ocelí a ledeburitických liatin podľa rovnovážneho metastabilného binárneho diagramu Fe-Fe₃C a podľa kriviek ochladzovania predikovať zloženie fázové zloženie a zloženie štruktúrnych zložiek zliatin pri teplote okolia.

Teoretická časť

Zliatiny z rovnovážneho binárneho diagramu Fe-C, ako ocele tak aj liatiny, patria medzi významné konštrukčné materiály, preto ich rozbor štruktúr, vlastností a možnosti ovplyvnenia vlastností pomocou tepelného spracovania sú zahrnuté v predmete Náuka o materiáloch.

V rovnovážnom binárnom diagrame Fe-C môže uhlík kryštalizovať v stabilnej forme ako grafit alebo v metastabilnej forme ako karbid železa Fe₃C - cementit. Na Obr. 24 je znázornený rovnovážny metastabilný binárny diagram Fe-Fe₃C. Keďže cementit môžeme považovať za zložku (komponent), binárny diagram nezobrazujeme za hmotnostným percentom uhlíka 6,67 % (25 at. % C), ktoré odpovedá čistému cementitu, z dôvodu technického použitia zliatin z vyšším percentom uhlíka.



Obr. 24 Rovnovážny metastabilný binárny diagram Fe – Fe₃C popísaný štruktúrnymi zložkami.

Rovnovážny metastabilný binárny diagram Fe-Fe₃C je tvorený na jednej strane čistou zložkou Fe, ktorá kryštalizuje pri teplote 1536 °C a v teplotnom intervale od teploty kryštalizácie až po teplotu okolia má tri alotropické modifikácie:

- 1536 °C - kryštalizácia Fe_δ s kryštalickou mriežkou kubickú objemovo centrovanou (K8, resp. bcc)
- 1392 °C – polymorfná premena Fe_δ → Fe_γ, ktorá má kryštalickú mriežku kubickú plošne centrovanú (K12, resp. fcc)
- 911 °C – polymorfná premena Fe_γ → Fe_α, ktorá má kryštalickú mriežku kubickú objemovo centrovanú (K8, resp. bcc)

Na druhej strane metastabilného binárneho diagramu uvažujeme komponent Fe₃C, ktorý kryštalizuje v rombickej sústave a nepvykazuje žiadnu polymorfnú premenu.

V rovnovážnom metastabilnom binárnom diagrame železo čiastočne rozpúšťa uhlík vo svojich alotropických modifikáciách za vzniku tuhých roztokov:

- *Ferit delta* – intersticiálny tuhý roztok C v Fe_δ s rozpustnosťou 0,1 hmot. % C pri teplote 1499 °C, ktorý sa označuje Fe_δ(C), resp. δ
- *Austenit* – intersticiálny tuhý roztok C v Fe_γ s rozpustnosťou 2,14 hmot. % C pri teplote 1147 °C, ktorý sa označuje Fe_γ(C), resp. γ
- *Ferit alfa* – intersticiálny tuhý roztok C v Fe_α s rozpustnosťou 0,02 hmot. % C pri teplote 727 °C, ktorý sa označuje Fe_α(C), resp. α

Cementit nerozpúšťa železo a z toho dôvodu vytvára so železom mechanické zmesi:

- *Ledeburit* – je eutektikum a kryštalizuje z taveniny pri teplote 1147 °C a koncentrácii 4,3 hmot. % C, ktoré sa skladá z austenitu a cementitu
- *Perlit* – je eutektoid a vzniká rozpadom tuhého roztoku austenitu pri teplote 727 °C s obsahom 0,77 hmot. % C za vzniku eutektoidu, ktorý je tvorený feritom alfa a cementitom
- *Ledeburit premenený* – eutektický ledeburit obsahuje austenit, ktorý sa rozpadá podľa eutektoidnej transformácie pri teplote 727 °C na perlit a preto sa ledebudrit premenený skladá zo štruktúrnych zložiek cementitu a perlitu

Podľa obsahu uhlíka v binárnom diagrame rozdeľujeme zliatiny kryštalizujúce v sústave Fe-Fe₃C na dve významné oblasti materiálov:

- *Ocele* sú zliatiny železa a uhlíka s obsahom do 2,14 hmot. % uhlíka

- *Ledeburitické (biele) liatiny* sú zliatiny železa a uhlíka s obsahom od 2,14 hmot. % do 6,67 hmot. % uhlíka, pričom uhlík kryštalizuje v metastabilnej forme za vzniku cementitu

Ocele a ledeburitické liatiny v metastabilnom diagrame rozdeľujeme podľa obsahu uhlíka na:

- *podutektoidné ocele* – obsah uhlíka do 0,77 hmot. %
- *eutektoidné ocele* – obsah uhlíka 0,77 hmot. %
- *nadeutektoidné ocele* – obsah uhlíka od 0,77 do 2,14 hmot. %
- *podeutektické ledeburitické liatiny* – obsah uhlíka od 2,14 do 4,3 hmot. %
- *eutektické ledeburitické liatiny* – obsah uhlíka 4,3 hmot. %
- *nadeutektické ledeburitické liatiny* – obsah uhlíka od 4,3 do 6,67 hmot. %

Podrobný rozbor rovnovážneho metastabilného binárneho diagramu Fe-Fe₃C prostredníctvom popisu kriviek ochladzovania rôznych zliatin sústavy, fázových premien a tvorby štruktúry sú úlohou vyučovacej jednotky.

Úlohy cvičenia

1. Nakreslite krivky ochladzovania pre zvolené ocele a ledeburitické liatiny.
2. Schematicky nakreslite štruktúru pre zvolené ocele a ledeburitické liatiny pri teplote okolia.

ŠTRUKTÚRA OCELÍ A LEDEBURITICKÝCH LIATIN

Cieľ cvičenia

Oboznámiť sa so štruktúrou ocelí a ledeburitických (bielych) liatin, podmienkami ich vzniku, ich transformáciou a morfológiou ich jednotlivých štruktúrnych zložiek.

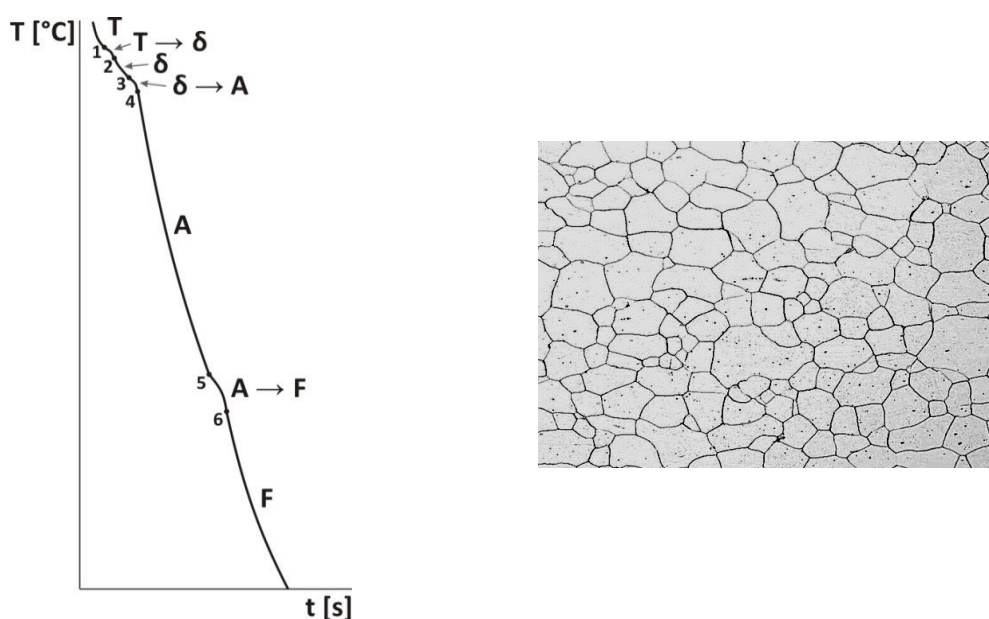
Štúdium štruktúr ocelí a ledeburitických liatin

V predchádzajúcej kapitole sme sa oboznámili s metastabilným diagramom Fe - Fe₃C a zadefinovali sme si možné existujúce fázy, resp. štruktúrne zložky v tomto systéme v rozsahu určitých teplôt a koncentrácií daných zložiek. V tejto kapitole sa budeme venovať výslednej štruktúre podeutektoidných, eutektoidných a nadeutektoidných ocelí a taktiež podeutektických, eutektických a nadeutektických ledeburitických liatin.

Pre bližšie charakterizovanie procesov prebiehajúcich počas ochladzovania spomínaných ocelí a liatin, si ukážeme ich kryštalizáciu a transformáciu na vybraných príkladoch. U každej tejto zliatiny si vysvetlíme proces primárnej kryštalizácie, proces prekryštalizácie a prípadné zmeny rozpustnosti uhlíka v tuhých roztokoch.

Ochladzovanie ocele s obsahom 0,01 % C – vznik feritickej štruktúry

Na Obr. 25 je znázornená krivka ochladzovania nízkouhlíkovej ocele s obsahom 0,01 % uhlíka. Pre lepšie zorientovanie je vhodné si túto zliatinu vyznačiť do binárneho diagramu Fe – Fe₃C a sledovať priesečníky čiary koncentrácie danej ocele s jednotlivými čiarami diagramu.



Obr. 25 Krivka ochladzovania ocele s obsahom 0,01 % C a výsledná feritická štruktúra.

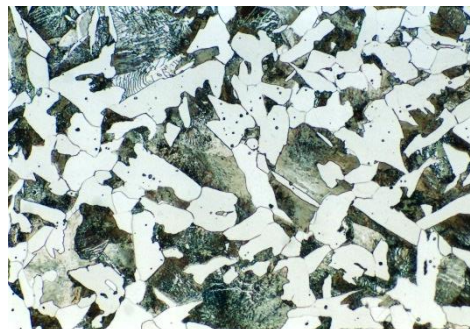
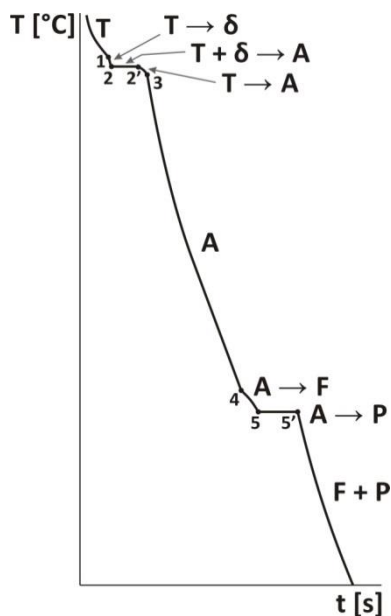
Pri teplote danej bodom 1 začína kryštalizácia ocele vylučovaním kryštálov tuhého roztoku δ z taveniny. Pri teplote danej bodom 2 je proces kryštalizácie ukončený a štruktúra je tak tvorená len tuhým roztokom δ . V rozmedzí teplôt daných bodmi 2 a 3 prebieha voľné ochladzovanie tejto jednofázovej štruktúry. Po dosiahnutí teploty danej bodom 3 dochádza k polymorfnej premene fázy δ na fázu γ , teda k prekryštalizácii δ -feritu na austenit. Táto fázová transformácia prebieha až po teplotu danú bodom 4 a pod touto teplotou existuje v systéme už len jedna fáza – austenit, ktorý sa následne ochladzuje až po dosiahnutí teploty danej bodom 5. Dosiahnutím tejto teploty nastáva polymorfná premena fázy γ na fázu α , teda prekryštalizácia austenitu na ferit, čo sa deje až po dosiahnutí teploty danej bodom 6. Následne ďalšie ochladzovanie sústavy až na izbovú teplotu zabezpečí, že výsledná štruktúra tejto ocele je tvorená len jednou fázou feritom a nazývame ju feritická štruktúra.

Ochladzovanie ocele s obsahom 0,3 % C – vznik feriticko-perlitickej štruktúry

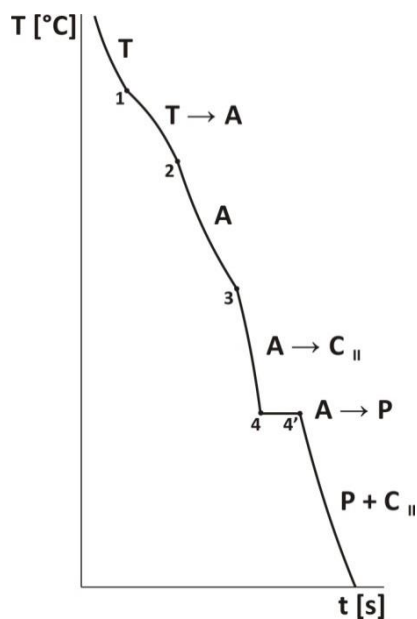
Primárna kryštalizácia δ -feritu z taveniny tejto ocele začína pri teplote danej bodom 1, ako môžete pozorovať na Obr. 26. Po dosiahnutí teploty danej bodom 2 (1499 °C) prebieha peritektická premena, to znamená, že kryštality fázy δ reagujú s časťou taveniny za vzniku austenitu s obsahom 0,16 % C. Peritektická premena prebieha za konštantnej teploty, čomu odpovedá zadržná čiara na krivke ochladzovania ocele. Kryštalizácia následne prebieha vylučovaním austenitu zo zostávajúcej taveniny a to až po teplotu danou bodom 3. Pod touto teplotou je štruktúra tvorená len austenitom, ktorý je následne ochladzovaný až do teploty danej bodom 4. Pod touto teplotou dochádza k prekryštalizácii austenitu na ferit v dôsledku polymorfnej premeny a v dôsledku rôznej rozpustnosti uhlíka vo ferite a austenite prebehne aj prerozdelenie uhlíka. Vylúčením feritu dochádza k nasycovaniu austenitu uhlíkom v rozsahu teplôt bodov 4 a 5 a tým dosiahne austenit zloženie 0,77 % C, stáva sa nestabilným a začne jeho eutektoidný rozpad na perlit. Po ochladení sústavy na izbovú teplotu je výsledná štruktúra ocele tvorená feritom a perlitom, teda je feriticko-perlitická.

Ochladzovanie ocele s obsahom 1,5 % C – vznik perliticko-cementitickej štruktúry

Pri teplote danej ocele určenej bodom 1 (Obr. 27) dochádza k primárnej kryštalizácii austenitu z taveniny. S klesajúcou teplotou dochádza k zmene chemického zloženia taveniny aj austenitu až po teplotu danou bodom 2, pod ktorou je v štruktúre prítomný len austenit. Následne pod teplotou danou bodom 2 dochádza k ochladzovaniu austenitu až do teploty danej bodom 3, pri ktorej sa stáva austenit presýtený uhlíkom a dochádza tak k vylučovaniu sekundárneho cementitu. Následným ochladzovaním sústavy dochádza k poklesu obsahu uhlíka v austenite až na 0,77 % C pri teplote 727 °C, čím dochádza k jeho rozpadu na perlit. Výsledná štruktúra je tvorená perlitom a sekundárnym cementitom, ktorý je vylúčený vo forme sieťovia okolo zŕn perlitu.



Obr. 26 Krivka ochladzovania ocele s obsahom 0,3 % C a výsledná feriticko-perlitická štruktúra.

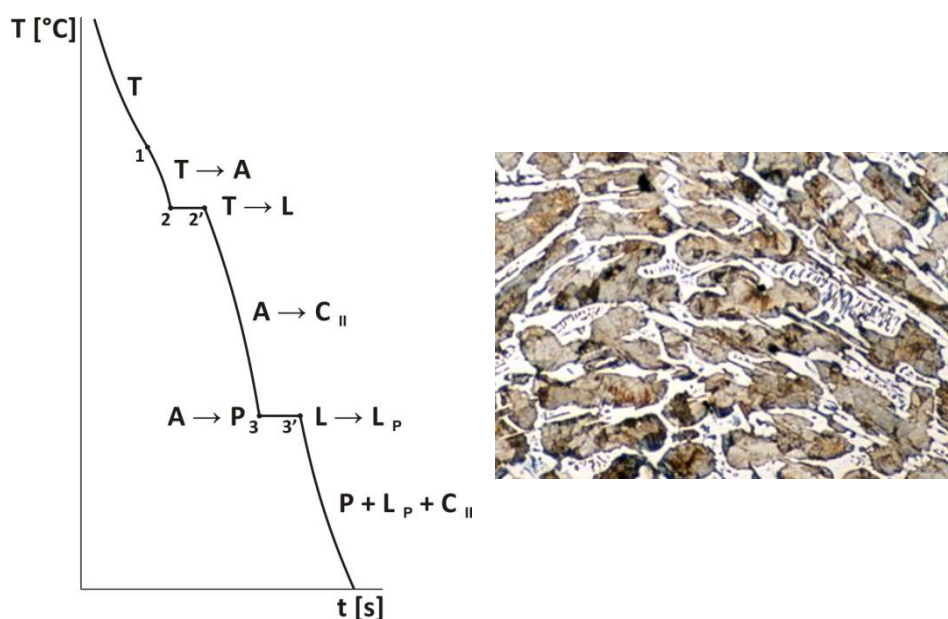


Obr. 27 Krivka ochladzovania ocele s obsahom 1,5 % C a výsledná perliticko-cementitická štruktúra.

Ochladzovanie liatiny s obsahom 3,0 % C – vznik štruktúry podeutektickej ledeburitickej liatiny

Kryštalizácia tejto liatiny začína po dosiahnutí teploty danej bodom 1 (Obr. 28) a to vznikom a rastom kryštálov austenitu z taveniny. S klesajúcou teplotou rastie množstvo austenitu, mení sa jeho zloženie a po dosiahnutí teploty danej bodom 2 (1147 °C) má tavenina obsah 4,3 % C a austenit 2,14 % C. Za týchto podmienok prebieha kryštalizácia eutektika – ledeburitu. Inými slovami rozpad taveniny na zmes austenitu

a cementitu. Následným ochladzovaním sústavy až do teploty danej bodom 3 dochádza k vylučovaniu sekundárneho cementitu z austenitu z dôvodu zmeny rozpustnosti uhlíka v austenite. Na eutektoidnej teplote má všetok austenit (primárny vylúčený z taveniny aj austenit v ledeburite) zloženie 0,77 % C a preto prebieha eutektoidná premena – rozpad austenitu na perlit. Výsledná štruktúra je tvorená perlitom, sekundárnym cementitom a pretvoreným ledeburitom.



Obr. 28 Krivka ochladzovania liatiny s obsahom 3 % C a výsledná štruktúra podeutektickej liatiny.

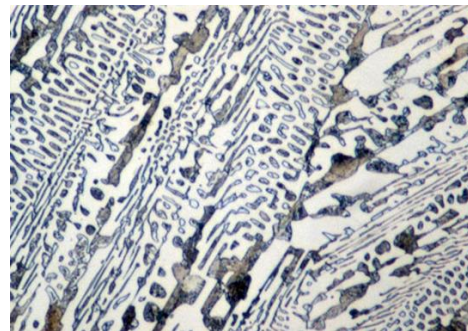
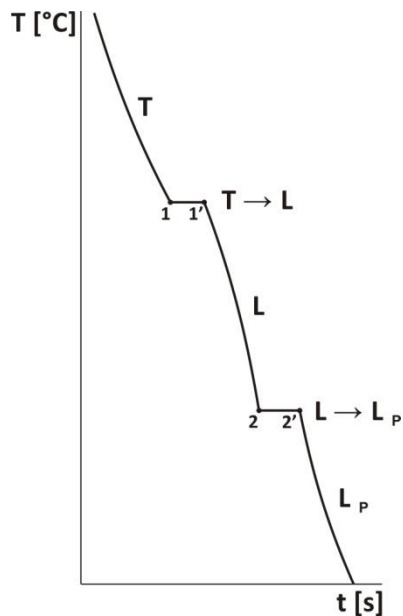
Ochladzovanie liatiny s obsahom 4,3 % C – vznik štruktúry eutektickej ledeburitickej liatiny

V prípade liatiny s obsahom uhlíka 4,3 % dochádza do teploty danej bodom 1 (Obr. 30) k ochladzovaniu taveniny a na tejto konštantnej teplote (1147 °C) prebieha kryštalizácia eutektika – ledeburitu priamo z taveniny. Následným ochladzovaním sústavy v teplotnom rozsahu daným bodmi 1' a 2 dochádza k ochladzovaniu tejto zmesi austenitu a cementitu a po dosiahnutí teploty danej bodom 2 (727 °C) dochádza k transformácii austenitu v ledeburite na perlit za vzniku pretvoreného ledeburitu, teda zmes perlitu a cementitu. Výsledná štruktúra liatiny je tvorená len pretvoreným ledeburitom.

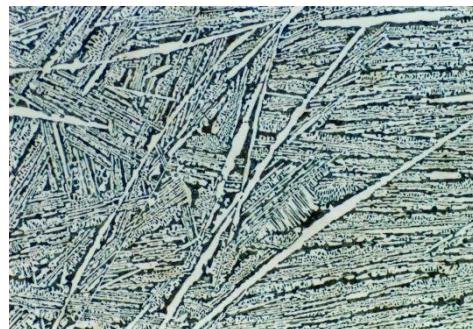
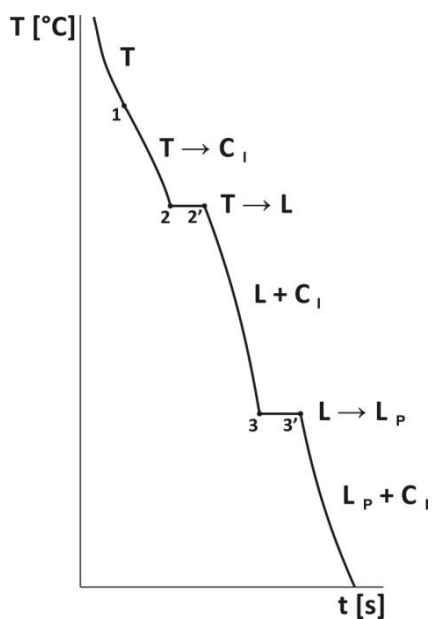
Ochladzovanie liatiny s obsahom 5,0 % C – vznik štruktúry nadeutektickej ledeburitickej liatiny

Na Obr. 30 je znázornená krivka ochladzovania liatiny s obsahom 5 % uhlíka. K ochladzovaniu taveniny tejto liatiny dochádza do teploty danej bodom 1 a pri tejto teplote začína primárna kryštalizácia cementitu. Po dosiahnutí eutektickej teploty (bod 2) má tavenina zloženie 4,3 % C a nastáva jej rozpad na ledeburit. Ďalším ochladzovaním sústavy

v rozsahu teplôt daných bodmi 2' a 3 sa mení zloženie austenitu prítomného v ledeburite a preto sa vylučuje sekundárny cementit. Po dosiahnutí eutektoidnej teploty (bod 3) dochádza k premene austenitu v ledeburite na perlit, čo má za následok, že výsledná štruktúra tejto liatiny je tvorená pretvoreným ledeburitom a primárnym cementitom v podobe ihlíc.



Obr. 29 Krivka ochladzovania liatiny s obsahom 4,3 % C a výsledná štruktúra eutektickej liatiny.



Obr. 30 Krivka ochladzovania liatiny s obsahom 5 % C a výsledná štruktúra nadeutektickej liatiny.

Úlohy cvičenia

1. Pozorujte štruktúry podeutektoidnej, eutektoidnej a nadeutektoidnej ocele pomocou metalografického svetelného mikroskopu. Nakreslite a popíšte uvedené štruktúry ocele.
2. Pozorujte štruktúry podeutektickej, eutektickej a nadeutektickej liatiny pomocou metalografického svetelného mikroskopu. Nakreslite a popíšte uvedené štruktúry ledeburitickej liatiny. Štruktúra grafitických liatin

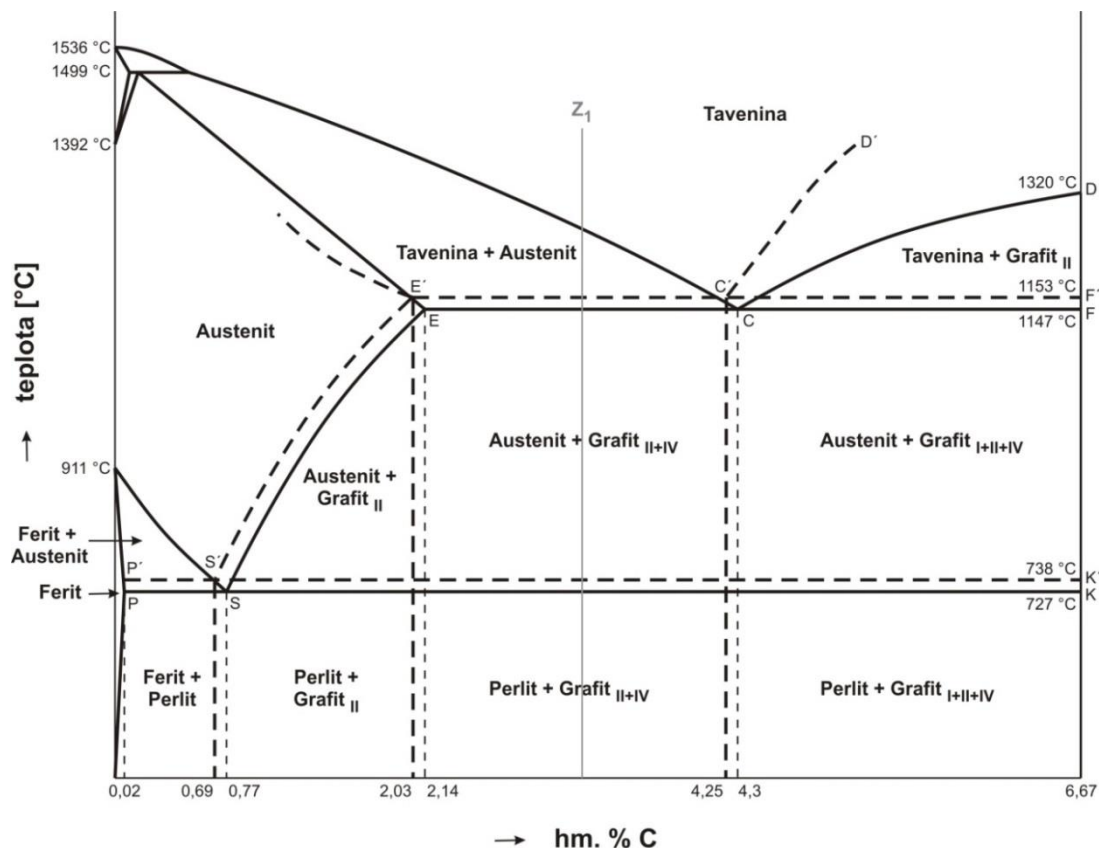
ŠTRUKTÚRA GRAFITICKÝCH LIATIN

Cieľ cvičenia

Oboznámiť sa so stabilným rovnovážnym diagramom Fe – grafit, vplyvom rýchlosti ochladzovania a chemického zloženia na výslednú štruktúru grafitických (sivých) liatin, vplyvom veľkosti, tvaru a rozloženia grafitu na ich vlastnosti a vplyvom očkovania na tvar grafitu v grafitických liatinách.

Rovnovážna sústava Fe – grafit

Rozborom rovnovážneho metastabilného diagramu Fe – Fe₃C sme sa zaoberali v kapitole 6, kedy sme poukázali na vytváranie austeniticko-cementitickej, resp. feriticko-cementitickej zmesi. V tejto kapitole sa budeme venovať vytváraniu austeniticko-grafitickej, resp. feriticko-grafitickej zmesi v danom systéme, čiže vytváraniu stabilnej fázy grafitu v matrici feritu alebo austenitu. Vznik grafitu môže prebiehať viacerými spôsobmi: kryštalizáciou z taveniny, vylučovaním z tuhého roztoku alebo procesom rozpadu cementitu. Na Obr. 31 je rovnovážny stabilný diagram *Fe – grafit* vkreslený do metastabilného diagramu Fe – Fe₃C, v ktorom sa riadime plnými čiarami v prípade sústavy železo – cementit a prerušovanými čiarami v prípade sústavy železo – grafit. Vytváranie štruktúrnych zložiek s grafitom prebieha pri vyšších teplotách a preto čiary fázových rovnováh ležia pri vyšších teplotách, ako je vidieť v danom diagrame.



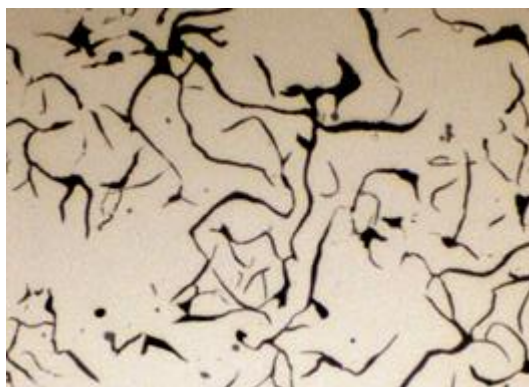
Obr. 31 Rovnovážny stabilný diagram Fe – grafit.

V tomto diagrame prerušovaná čiara E'C'F' pri teplote 1153 °C predstavuje fázovú rovnováhu $T \rightarrow A + G$ a prerušovaná čiara P'S'K' pri teplote 738 °C predstavuje fázovú rovnováhu $A \rightarrow F + G$. Menšia rozpustnosť uhlíka v austenite a tavenine vedie k tomu, že prerušované čiary S'E' a C'D' sú posunuté k nižším koncentráciám. Primárny grafit kryštalizuje v danej stabilnej sústave pri teplotách odpovedajúcich čiare C'D'. Grafitické eutektikum skladajúce sa z austenitu a grafitu sa vytvára na čiare E'C'F'. Na čiare E'S' sa začína vylučovať z austenitu grafit a na čiare P'S'K' vzniká eutektoid skladajúci sa z feritu a grafitu.

Vytváranie grafitu z taveniny ako aj z austenitu prebieha pri ochladzovaní v úzkom teplotnom intervale medzi čiarami stabilnej a metastabilnej rovnováhy, t.j. v podmienkach malých podchladení, resp. malých rýchlostiach ochladzovania. Z toho je jasné, že vytváranie štruktúr sivých grafitických liatin prebieha pri pomalom ochladzovaní a štruktúr bielych ledeburitických liatin pri rýchlom ochladzovaní. Vytváranie grafitu z taveniny alebo z austenitu je proces veľmi pomalý, nakoľko energia vynaložená pre vytvorenie zárodku grafitu je veľká a je preto potrebná výrazná difúzia atómov uhlíka pre rast kryštálov grafitu. Zároveň je potrebný aj odvod atómov železa od povrchu rastúcich kryštálov grafitu.

V čistých sústavách železo – uhlík pri bežných rýchlostiach ochladzovania by bolo vytváranie grafitu z taveniny alebo austenitu málo pravdepodobné. Štruktúrna stavba grafitických liatin nie je len funkciou ochladzovania, ale hlavne funkciou chemického zloženia. V tavenine liatiny sú prítomné rôzne častice ako SiO_2 , Al_2O_3 a iné, ktoré uľahčujú vytváranie a rast grafitu. Pre uľahčenie grafitizácie sa preto pridávajú látky, tzv. modifikátory alebo tiež očkovadlá.

V závislosti od podmienok kryštalizácie sa vytvárajú útvary grafitu rôzneho tvaru, čo má veľký vplyv na mechanické vlastnosti liatin. Rastu kryštálov grafitu predchádza vznik zárodkov grafitu v tavenine a ich počiatočný rast. V bezprostrednej blízkosti grafitu sa vytvorí nízka koncentrácia uhlíka a v tejto oblasti sa vytvoria zárodky austenitu, ktoré rastú rýchlejšie a tým vytvárajú okolo grafitu v niektorých miestach tuhú fázu. No koncové oblasti grafitu sa ešte nachádzajú v styku s taveninou a v tomto smere môžu ďalej rásť. Preto môžeme na ploche metalografického výbrusu pozorovať grafit v podobe lupienkov (Obr. 32). Keď dôjde k úplnému uzavretiu kryštálu grafitu, tak potom ďalší rast je možný len cestou difúzie uhlíka cez austenit. V grafitických sivých liatinách sa základná časť grafitu vytvára v procese kryštalizácie z taveniny a grafit vznikajúci pri rozpade austenitu nevytvára samostatné častice, ale naväzuje na častice už vytvorené.



Obr. 32 Mikroštruktúra liatiny s lupienkovitým grafitom.

Ako už bolo uvedené grafit sa môže tvoriť tiež rozpadom cementitu. Tento proces môže prebiehať len za určitých podmienok. Pre priebeh procesu rozpadu cementitu je potrebná difúzia uhlíka k zárodkom grafitu a samodifúzia železa od miest, kde sa grafit vytvára. Pri nízkych teplotách tento proces prakticky neprebíha, no so zvýšením teploty sa proces veľmi urýchľuje.

Štúdium štruktúry grafitických liatin

Na výslednú štruktúru sivých liatin vplýva nielen chemické zloženie, ale tiež podmienky tavenia a spracovania taveniny pred odlieváním a predovšetkým podmienky ochladzovania. Z toho vyplýva, že dôležitú úlohu má veľkosť odliatku, hrúbka stien formy a jej schopnosť odvodu tepla. Požadované vlastností odliatkov zo sivej liatiny možno teda dosiahnuť riadeným ochladzovaním, čo ovplyvňuje proces grafitizácie.

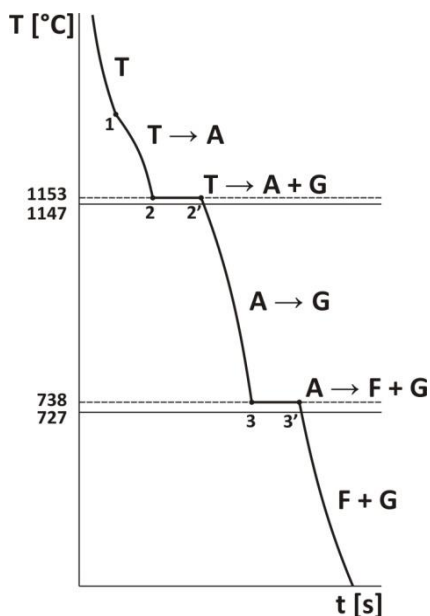
Ochladzovanie sivých liatin v reálnych podmienkach je odlišné od podmienok rovnovážnych a preto podľa rovnovážneho diagramu nemôžeme posudzovať procesy kryštalizácie a získané štruktúry v prevádzkových podmienkach. Rýchlosť ochladzovania pri kryštalizácii má vplyv na množstvo uhlíka viazaného na cementit.

Vplyv rýchlosti ochladzovania na výslednú štruktúru zvolenej zliatiny z_1 (viď diagram na Obr. 31) budeme sledovať pri rôznych rýchlostiach v_1 až v_5 , pričom $v_1 < v_2 < v_3 < v_4$.

Ochladzovanie zliatiny z_1 rýchlosťou v_1 – vznik feritickej sivej liatiny

Na Obr. 33 je znázornená krivka ochladzovania zliatiny z_1 . Nad teplotou označenou bodom 1 je daná zliatina v tekutom stave, čiže vo forme taveniny. Tesne pod teplotou danou bodom 1 začína proces kryštalizácie – vylučovanie kryštálov austenitu z taveniny. Keďže ochladzovanie sústavy je pomalé, pri teplote bodu 2 (1153 °C) dochádza k stabilnej kryštalizácii za konštantnej teploty, to znamená, že z taveniny vzniká austenit a eutektický grafit. Následným pomalým ochladzovaním sústavy od teploty danej bodom 2' až do teploty

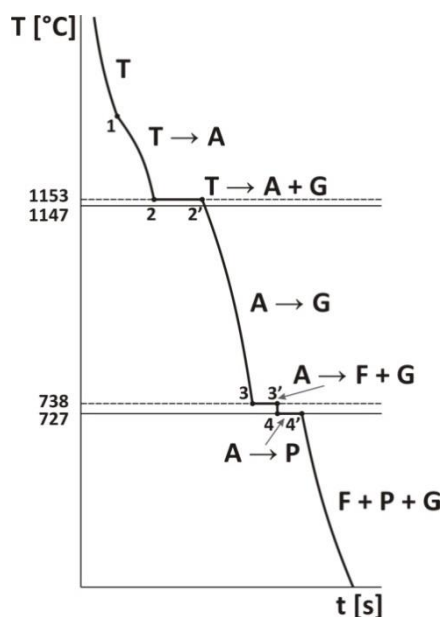
danej bodom 3 (738 °C) sa z austenitu vylučuje sekundárny grafit a difúzne sa pripája k eutektickému grafitu. Pri teplote 738 °C sa austenit rozpadáva na ferit a eutektoidný grafit. Aj tento grafit sa vylučuje na eutektickom grafitu. Následne dochádza k ochladzovaniu sústavy z teploty danej bodom 3' na izbovú teplotu a výsledná štruktúra zliatiny bude tvorená feritom (základná kovová matrica) a grafitom.



Obr. 33 Krivka ochladzovania zliatiny rýchlosťou v_1 a výsledná štruktúra feritickej sivej liatiny.

Ochladzovanie zliatiny z_1 rýchlosťou v_2 – vznik feriticko-perlitickej sivej liatiny

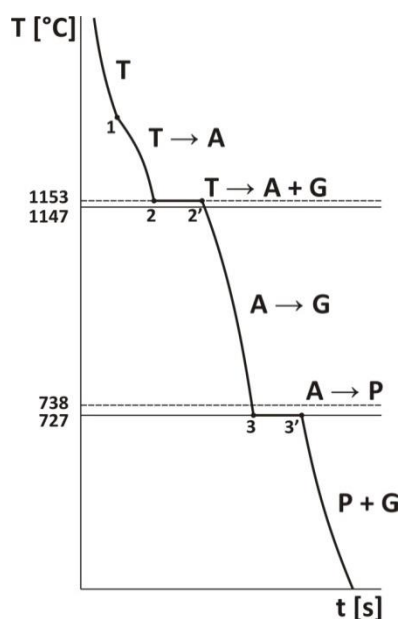
Proces kryštalizácie danej zliatiny bude až po teplotu 738 °C prebiehať ako v predošlom prípade (viď Obr. 34). Pri teplote 738 °C (body 3 až 3') prebieha rozpad austenitu na ferit a grafit. Ak v tomto procese zvýšime rýchlosť ochladzovania, tak sa rozpadne len časť austenitu a druhá časť austenitu sa bude rozpadávať metastabilne na zmes feritu a cementitu, teda na perlit (body 4 až 4'). Výsledná štruktúra zliatiny bude tvorená feritom a perlitom s vylúčeným grafitom (eutektickým, sekundárnym a sčasti eutektoidným).



Obr. 34 Krivka ochladzovania zliatiny rýchlosťou v_2 a výsledná štruktúra feriticko-perlitickej sivej liatiny.

Ochladzovanie zliatiny z_1 rýchlosťou v_3 – vznik perlitickej sivej liatiny

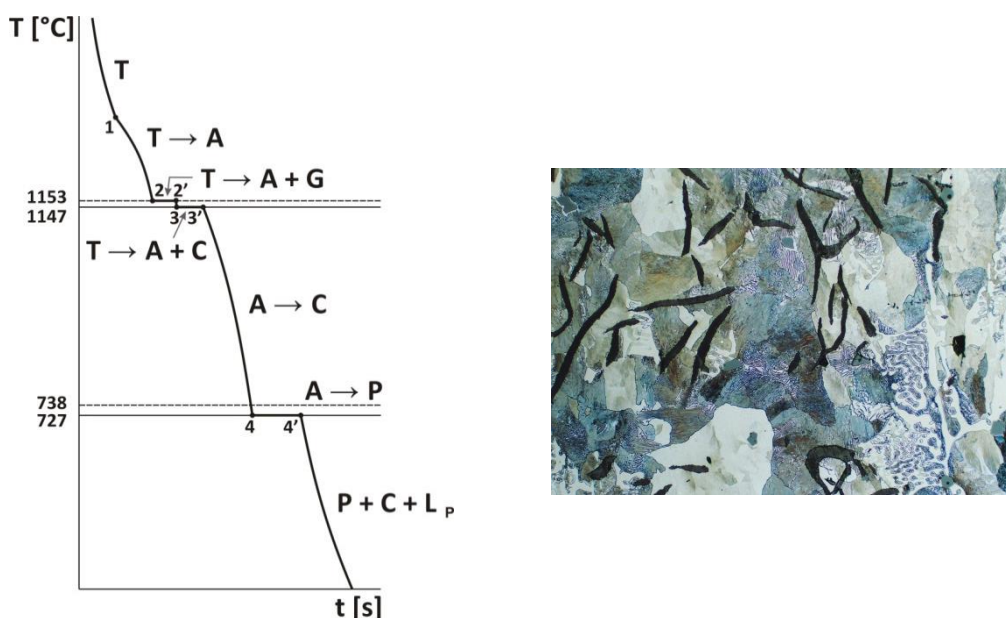
Kryštalizácia danej zliatiny bude po teplote 738 °C prebiehať ako v oboch predošlých prípadoch identicky, čo je zrejmé z Obr. 35. Z dôvodu zvýšenia rýchlosti ochladzovania nedôjde k eutektoidnému rozpadu austenitu pri teplote 738 °C, ale všetok austenit sa metastabilne rozpadne pri teplote 727 °C na perlit (body 3 až 3'). Týmto spôsobom následne dosiahneme pri izbovej teplote štruktúru sivej liatiny tvorenú perlitom a grafitom.



Obr. 35 Krivka ochladzovania zliatiny rýchlosťou v_3 a výsledná štruktúra perlitickej sivej liatiny.

Ochladzovanie zliatiny z_1 rýchlosťou v_4 – vznik makovej sivej liatiny

Zvýšenie rýchlosti ochladzovania danej zliatiny v procese kryštalizácie eutektika môže spôsobiť, že tavenina eutektického zloženia sa čiastočne rozpadne na austenit a grafit (stabilne) a čiastočne na austenit a cementit (metastabilne), ako môžeme pozorovať na Obr. 36. Týmto procesom vzniká dvojité eutektikum, pretože časť eutektickej reakcie mala stabilný (body 2 až 2') a časť metastabilný charakter (body 3 až 3'). Po ukončení eutektickej kryštalizácie celý ďalší proces ochladzovania sústavy prebehne metastabilne, preto pri teplote okolia bude v štruktúre sivej liatiny prítomný perlit, premenený ledeburit, sekundárny cementit a grafit. Sekundárny cementit nie je pozorovateľný, pretože sa spojil s ledeburitickým cementitom. Táto sivá liatina sa označuje podľa vzhľadu mikroštruktúry makovou sivou liatinou.

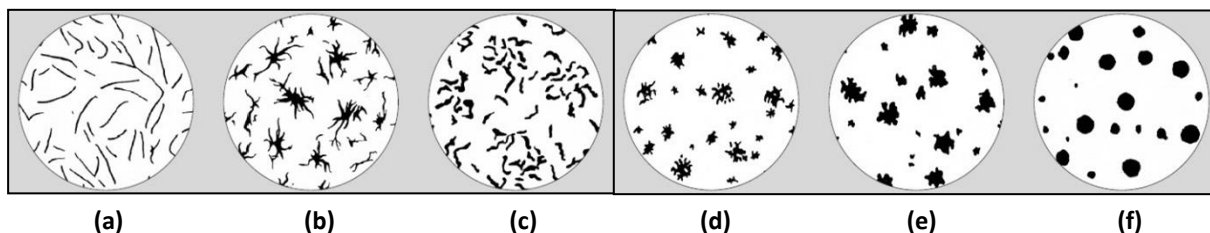


Obr. 36 Krivka ochladzovania zliatiny rýchlosťou v_4 a výsledná štruktúra makovej sivej liatiny.

Následným zvyšovaním rýchlosti ochladzovania danej zliatiny bude proces prebiehať metastabilne a výsledkom bude biela liatina.

Druhy grafitických liatin

Vlastnosti sivých liatin sa pohybujú v pomerne širokom intervale podľa charakteru základnej kovovej matrice a podľa množstva a tvaru vylúčeného grafitu. Klasifikáciou grafitu vizuálnou analýzou sa zaoberá medzinárodná technická norma STN EN ISO 945-1, ktorá rozlišuje grafit lupienkový, pavúčkovitý, červíkovitý, vločkový, nedokonale zrnitý a zrnitý (globulárny), ako môžete vidieť na Obr. 37. Okrem tvaru grafitu sa táto norma zaoberá aj jeho distribúciou a veľkosťou.



Obr. 37 Tvar grafitu v sivých liatinách: lupienkový (a), pavúčkovitý (b), červíkovitý (c), vločkový (d), nedokonale zrnitý (e), zrnitý – globulárny (f).

Sivé liatiny s lupienkovitým grafitom sú najrozšírenejšie zlievarenské materiály. Ich nevýhodou je len malá ťažnosť a nízka húževnatosť, čo vyplýva zo samotného tvaru grafitu. Očkovaná sivá liatina vzniká pridávaním grafitizačných prísad – očkovadiel, ktorých úlohou je potlačiť podchladenie a zabezpečiť rovnomerné vylúčenie jemných lupienkov grafitu. V tvárnej sivej liatine je grafit vylúčený vo forme zŕn – zrnitý grafit. Globulárny tvar grafitu zabezpečuje vyššiu húževnatosť, pevnosť a tvárnosť liatiny v porovnaní s liatinou s lupienkovým grafitom. Temperovaná sivá liatina sa získava dlhodobým žiňaním odliatkov z bielej liatiny pri vysokých teplotách, kedy sa odstráni cementit, resp. sa zmení a z krehkej bielej liatiny sa stane tvárna temperovaná sivá liatina. Temperovaná sivá liatina vzniká buď oduhličovaním v oxidačnom prostredí a vzniká temperovaná sivá liatina s bielym lomom, alebo grafitizáciou cementitu v bielej liatine a vzniká temperovaná sivá liatina s čiernym lomom.

Úlohy cvičenia

1. Na základe pozorovania vzorky grafitickej liatiny svetelným mikroskopom vyhodnoťte tvar a spôsob vylúčenia grafitu.
2. Nakreslite a určte štruktúru základnej kovovej matrice na leptaných vzorkách grafitických liatin:
 - a) feriticko-perlitická
 - b) perliticko-feritická
 - c) perlitická
 - d) maková.
3. Nakreslite a popíšte štruktúru tvárnej a temperovanej liatiny.
4. Nakreslite a popíšte krivky ochladzovania grafitickej liatiny s obsahom 3 % C tak, aby štruktúra kovovej matrice bola:
 - a) feritická
 - b) feriticko-perlitická
 - c) perlitická
 - d) perliticko-cementiticko-ledeburitická

TEPELNÉ SPRACOVANIE MATERIÁLOV, ŽÍHANIE OCELÍ

Cieľ cvičenia

Zhodnotiť vplyv tepelného spracovania ocelí na štruktúrne zmeny a zmeny ich mechanických vlastností.

Teoretická časť

Tepelné spracovanie materiálov sa v praxi využíva za účelom dosiahnutia požadovanej štruktúry a vlastností materiálu. Môže byť zaradené ako finálne spracovanie výrobku, ale taktiež ako medzikrok pri spracovávaní polotovaru. Základnou operáciou tepelného spracovania je *žíhanie*, ktoré je základnou jednotkou technologického postupu tepelného spracovania a pozostáva z *ohrevu* na žihaciu teplotu, *výdrže na tejto teplote* a *ochladenia* na teplotu okolia.

Žíhanie ocelí môžeme rozdeliť podľa použitej teploty, resp. podľa fázových transformácií, ktoré v oceli prebiehajú na:

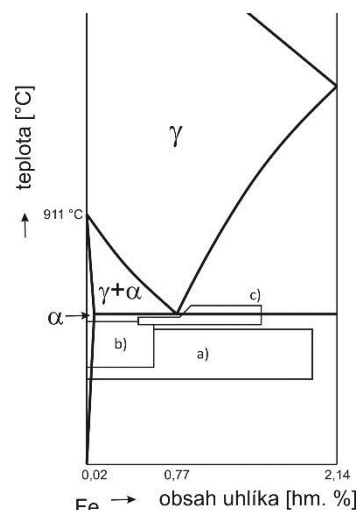
- *žíhanie bez prekryštalizácie*
- *žíhanie s prekryštalizáciou*

Žíhanie bez prekryštalizácie

Polotovar alebo hotový výrobok je ohrievaný na teplotu, pri ktorej nedochádza k fázovej premene feritu alebo cementitu na austenit. Uvedené príklady teplotných intervalov žíhania bez prekryštalizácie sú schematicky znázornené v metastabilnom rovnovážnom binárnom diagrame na Obr. 38.

a) *Žíhanie na odstránenie napätí*: cieľom žíhania je znížiť vnútorné napätia ocele cestou relaxácie, ktoré vznikli pri predchádzajúcom spracovaní ako napr. po hrubom obrábaní alebo zváraní. Vykonáva sa ohrevom ocele na teplotu v intervale 500 – 650 °C s výdržou na teplote asi 1 – 2 h.

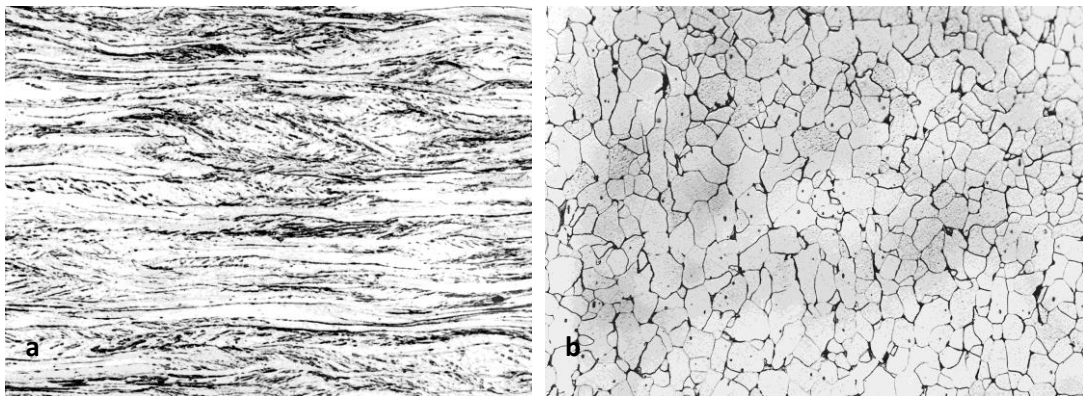
b) *Rekryštalizačné žíhanie*: používa sa na odstránenie spevnenia po tvárnení za studena. Pôvodná deformovaná štruktúra je úplne nahradená novou, nedeformovanou štruktúrou (Obr. 39), ktorá vzniká cestou tvorby rekryštalizačných zárodkov v deformovanej štruktúre a ich rastom, čím sa nahradí pôvodne deformovaná štruktúra nedeformovanou.



Obr. 38 Schematicky vyznačené teplotné intervaly žíhania a) na odstránenie napätí, b) rekryštalizačného a c) na mätko.

Rekryštalizačné žíhanie sa vykonáva ohrevom ocele na teplotu 550 – 700 °C s výdržou na teplote niekoľko minút až 1 hodinu.

- c) *Žíhanie na mätko*: cieľom žíhania na mätko je zníženie tvrdosti polotovaru, procesom sferoidizácie lamelárneho perlitu, za účelom zvýšenia obrobiteľnosti materiálu a súčasne zníženia opotrebovania nástrojov potrebných na spracovanie. Žíhanie na mätko môže byť zaradené pred nadchádzajúce trieskové opracovanie alebo tvárnenie za studena a realizuje sa pri teplotách tesne pod A_{c1} pre podeutektoidné ocele alebo pri teplotách tesne nad A_{c1} pre nadeutektoidné ocele s výdržou na teplote niekoľko hodín.

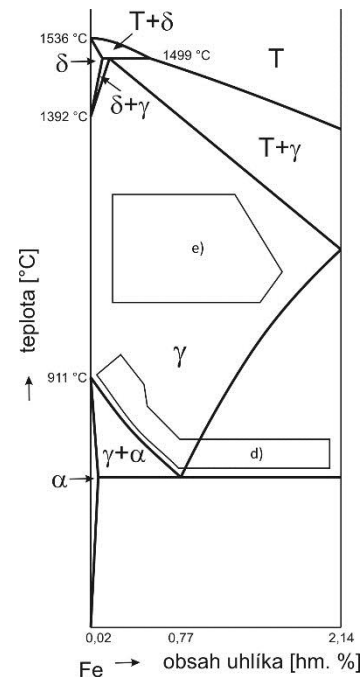


Obr. 39 Vplyv rekryštalizačného žíhania na mikroštruktúru ocele a) po tvárnení za studena; b) po tvárnení za studena a rekryštalizačnom žíhaní.

Žíhanie s prekryštalizáciou

Polotovary alebo hotové výrobky sa ohrievajú na teplotu, pri ktorej dochádza k fázovej premene feritu a cementitu na austenit. Uvedené príklady teplotných intervalov žíhania s prekryštalizáciou sú schematicky znázornené na Obr. 40.

- d) *Normalizačné žíhanie*: sa používa za účelom zjemnenia zrna austenitu prekryštalizáciou a vytvorenie jemnej rovnomernej výslednej štruktúry s priaznivými mechanickými vlastnosťami. Normalizačne sa žijajú takmer iba podeutektoidné ocele (nadeutektoidné ocele sa žijajú zriedka za účelom zlepšenia spôsobu vylúčenia sekundárneho cementitu, napr. pri výkovkoch, kde sa nevhodným pomalým ochladením vylúčil cementit po hraniciach



Obr. 40 Schematický vyznačené teplotné intervaly žíhania d) normalizačného a e) homogenizačného.

zrŕn). Nevyhnutné je tieŕ pri odliatkoch a vŕkovkoch, ktoré majú v pôvodnom stave nerovnomernú ŕtruktúru, príp. veľmi hrubé zrno. Teplota ŕíhania podeutektoidných ocelí je 30 až 50 °C nad teplotou A_{c3} ; doba výdrŕe na teplote 1 - 4 h. Ochladzovanie sa robí zásadne na vzduchu.

- e) *Homogenizačné (difúzne) ŕíhanie*: sa používa na odstránenie chemickej nehomogenity odliatkov a vŕkovkov pomocou difúzie. ŕíhacie teploty sú vysoké, 200 až 300 °C nad A_{c3} , t.j. 1100 až 1200 °C. Doba výdrŕe na teplote dosahuje až 20 hodín, aby dostatočne prebehli difúzne procesy. Vysoké teploty ŕíhania a dlhé doby výdrŕe na vysokej teplote vytvárajú vhodné podmienky pre rast autenitického zrna. Zjemnenie zrna po homogenizačnom ŕíhaní je možné dosiahnuť pri nasledujúcom normalizačnom ŕíhaní.

Úlohy cviĕenia

1. Nakreslite zmenu ŕtruktúry a zmenu tvrdosti HV ocele 19 191 po ŕíhaní na mäkko pri teplote 700 °C v závislosti dobe ŕíhania (0, 20, 60 a 100 hodín) s následným ochladením v peci.
2. Nakreslite ŕtruktúry ocele 12 050 v dodanom stave a po normalizačnom ŕíhaní. Popíŕte vplyv normalizačného ŕíhania na mikroŕtruktúru ocele.
3. Nakreslite mikroŕtruktúru ocele 12 010 po rôznych stupňoch deformácie za studena (oznaĕenie vzorky ČSN 12 010 $\epsilon = 10, 25, 50, 70 \%$) a po rekryŕalizácii deformovaných stavov (oznaĕenie vzorky ČSN 12 010 $\epsilon = 10, 25, 50, 70 \%$ + 550°C/2h). Popíŕte vplyv rekryŕalizačného ŕíhania na mikroŕtruktúru ocele.

TEPELNÉ SPRACOVANIE MATERIÁLOV, ZUŠLACHŤOVANIE OCELÍ

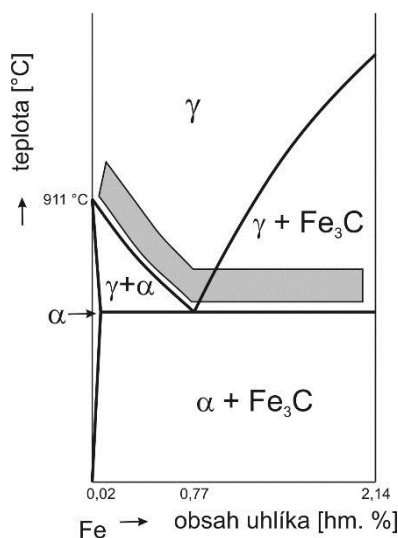
Cieľ cvičenia

Zhodnotiť vplyv kalenia a popúšťania ocelí na štruktúrne zmeny a zmeny ich mechanických vlastností.

Teoretický úvod

Kalenie je proces tepelného spracovania ocelí, ktorým získavame nerovnovážny štruktúrny stav, pomocou rýchleho ochladenia z austenitizačnej teploty za vzniku presýteného tuhého roztoku šmykovou transformáciou. Presýtenie uhlíkom má za následok deformáciu kryštalografickej mriežky kubickej na tetragonálnu objemovo centrovanú mriežku (T8). Kalenie pozostáva z ohrevu na austenitizačnú teplotu, výdrže na teplote (austenitizácia) a ochladenia vyššou rýchlosťou ako je kritická rýchlosť ochladzovania (zabrzdenie difúzie). Kaliaca teplota sa určuje pre uhlíkové ocele ako je to vyznačené na Obr. 41:

- podeutektoidné: 30 – 50 °C nad A_{c3}
- nadeutektoidné: 30 – 50 °C nad A_{c1}



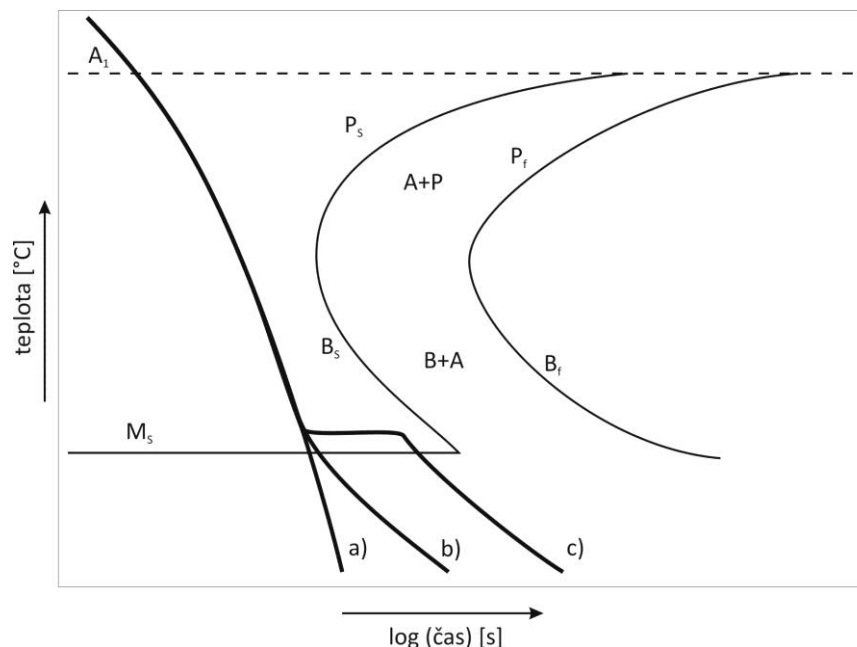
Obr. 41 Voľba kaliacej teploty uhlíkových ocelí.

Rozpad austenitu pri konštantnej teplote nám popisuje diagram IRA (izotermický rozpad austenitu) a pri plynulom ochladzovaní diagram ARA (anizotermický rozpad austenitu). Pre eutektoidnú oceľ je ARA diagram znázornený na Obr. 42. Podľa spôsobu ochladzovania a procesu rozpadu austenitu môže byť kalenie:

- a) martenzitické kalenie – výsledná štruktúra je tvorená bezdifúznym mechanizmom transformácie austenitu na presýtený tuhý roztok. Presýtenie uhlíkom spôsobuje deformáciu kryštalickej mriežky na tetragonálnu objemovo centrovanú. Takto

vznikajúci martenzit má veľký merný objem a preto vznikajú v štruktúre napätia, ktoré nedovolia premene všetkého austenitu. Preto je štruktúra ocele prevažne tvorená martenzitom a nepremeným austenitom. Martenzitické kalenie môže byť, Obr. 43:

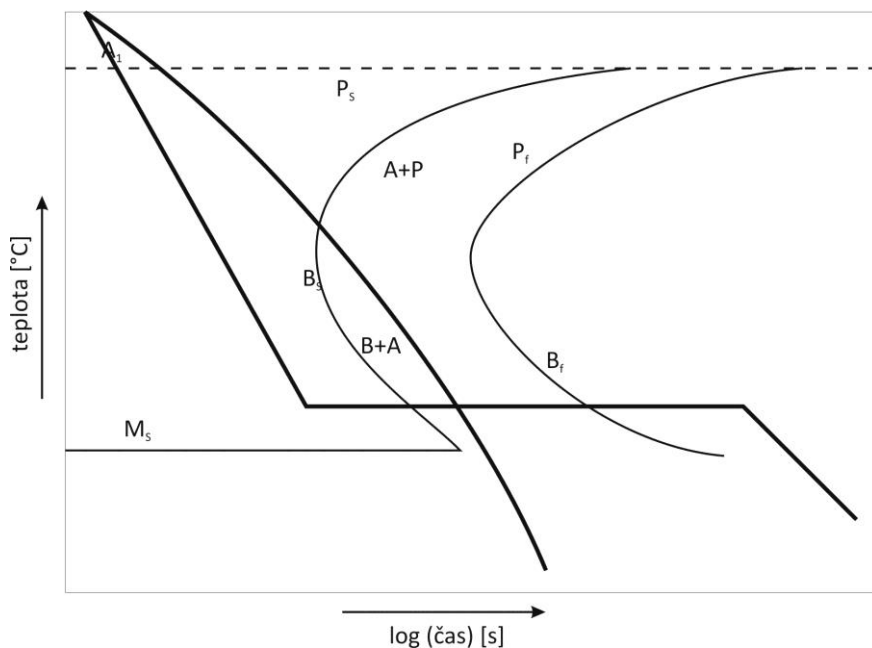
- nepretržité kalenie – používa sa najčastejšie z dôvodu jednoduchého ochladzovania v jednom prostredí, ale je nevhodné pre tvarovo náročné výrobky z legovaných ocelí
- lomené kalenie – rýchle ochladzovanie nad teplotu začiatku martenzitickej premeny (M_s) a následné ochladzovanie cez oblasť vzniku martenzitu v prostredí s menšou ochladzovacou rýchlosťou. Ako ochladzovacie prostredia môžu byť použité voda a potom olej
- termálne kalenie – rýchle ochladzovanie v prostredí, ktorého teplota je nad teplotou M_s a následné ochladzovanie v druhom prostredí cez teplotný interval vzniku martenzitu



Obr. 42 ARA diagram eutektoidnej ocele. Martenzitické kalenie a) nepretržité, b) lomené a c) termálne.

b) bainitické kalenie (Obr. 43) – výsledná štruktúra je tvorená polodifúznou premenou. Prebieha bezdifúzna premena austenitu na presýtený tuhý roztok, ale rýchlosť ochladzovania dovolí difúzii uhlíka vytvoriť cementitické častice. Bainitické kalenie môže byť:

- nepretržité – tvorená štruktúra je prevažne bainitom a martenzitom, pričom musí nasledovať popúšťanie
- izotermické – bainitická štruktúra sa tvorí pri konštantnej teplote, preto nemusí za kalením nasledovať proces popúšťania



Obr. 43 ARA diagram eutektoidnej ocele. Bainitické kalenie a) nepretržité a b) izotermické.

Popúšťanie je proces tepelného spracovania, ktorý nasleduje po martenzitickom alebo bainitickom nepretržitom kalení. Pozostáva z ohrevu martenzitickej štruktúry na teplotu pod teplotu A_{c1} za účelom získania rovnovážnejších štruktúr s menšou hodnotou vnútorných pnutí. Podľa výšky popúšťacej teploty rozdeľujeme popúšťanie na:

1. popúšťanie pri nízkych teplotách, ktoré sa najčastejšie používa po kalení nástrojov. Teplota popúšťania je do 350 °C. Pri tomto popúšťaní sa zníži krehkosť ocele, ale oceľ si zachováva vysokú tvrdosť. Výrazne sa zvýši húževnatosť.
2. popúšťanie pri vysokých teplotách sa používa po kalení konštrukčných ocelí. Teplota popúšťania je od 350 do 700 °C. Súčiastky, pri ktorých sa vyžaduje najmä vysoká húževnatosť sa popúšťajú pri 550 °C až 650 °C, kedy vzniká **sorbitická štruktúra** s veľmi priaznivou kombináciou mechanických vlastností, najmä medze klzu a húževnatosti.

Kombinácia postupov tepelného spracovania kalenia a popúšťania sa nazýva **zušľachtenie**.

Úlohy cvičenia

1. Nakreslite a popíšte štruktúru ocele 12 050:
 - a. v dodanom stave (pred kalením),
 - b. po kalení z teploty 740 °C,
 - c. po kalení z teploty 810 °C,
 - d. po kalení z teploty 1100 °C,
 - e. po popúšťaní (po správnom kalení).
2. Z pozorovaných štruktúr ocele 12 050 po kalení a z meranej tvrdosti určte a zdôvodnite správnu kalicu teplotu.

ŠTRUKTÚRA A VLASTNOSTI HLINÍKA, MEDI A ICH ZLIATIN

Cieľ cvičenia

Oboznámiť sa so štruktúrou a vlastnosťami hliníka, medi a ich zliatin so zameraním na možnosti ovplyvňovania štruktúr a zlepšovania mechanických vlastností silumínov, duralov, a mosadzí.

Hliník a jeho zliatiny

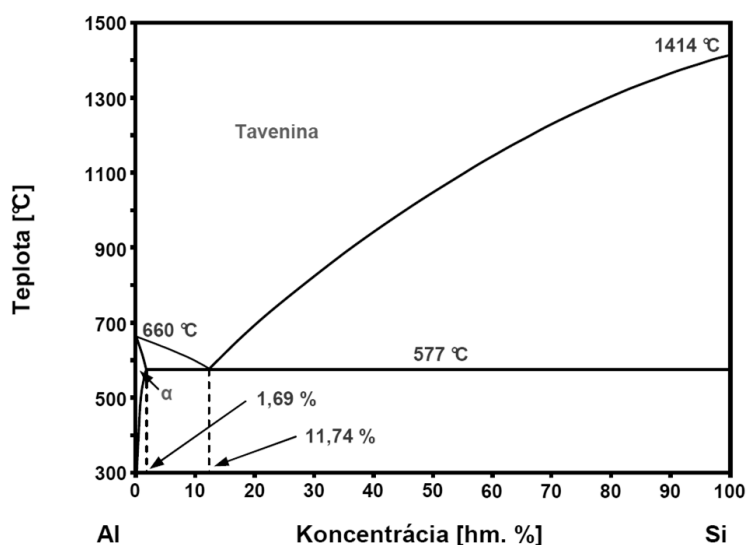
Hliník je jeden z najdôležitejších neželezných kovov, ktorý sa vďaka svojim mnohým pozitívnym vlastnostiam používa v takmer každej oblasti ľudskej činnosti. Čistý hliník má síce pomerne nízku pevnosť, no jeho veľkou výhodou je nízka merná hmotnosť, vysoká tepelná a elektrická vodivosť, vysoká tvárnosť, dobrá odolnosť voči korózii a pod. Zlepšenie mechanických, fyzikálnych, či technologických vlastností hliníka je možné predovšetkým jeho legovaním, tvárnením alebo tepelným spracovaním.

Procesom legovania čistého hliníka vznikajú **hliníkové zliatiny**, ktoré z hľadiska technológie výroby a spracovania delíme na *zliatiny pre tvárnenie* a *zliatiny pre odlievanie* (*zlievarenské zliatiny*). V každej tejto skupine je možné zliatiny hliníka rozdeliť z hľadiska možnosti zlepšenia ich mechanických vlastností tepelným spracovaním na *vytvrditeľné* a *nevytvrditeľné*.

Obidve skupiny, zliatiny pre odlievanie aj pre tvárnenie, je možné legovať rovnakými chemickými prvkami, no v rôznych obsahoch a pomeroch. Väčšie množstvo legúr obsahujú **hliníkové zliatiny pre odlievanie**. Ich veľkou výhodou je nízka teplota tavenia a úzky teplotný interval kryštalizácie, vyznačujú sa vynikajúcou zlievateľnosťou a odliatky sú chemicky stabilné, majú dobré povrchové vlastnosti a nízku náchylnosť k tvorbe trhlín za tepla. Najčastejšími zlievarenskými zliatinami hliníka sú zliatiny typu Al-Si, Al-Mg a Al-Cu.

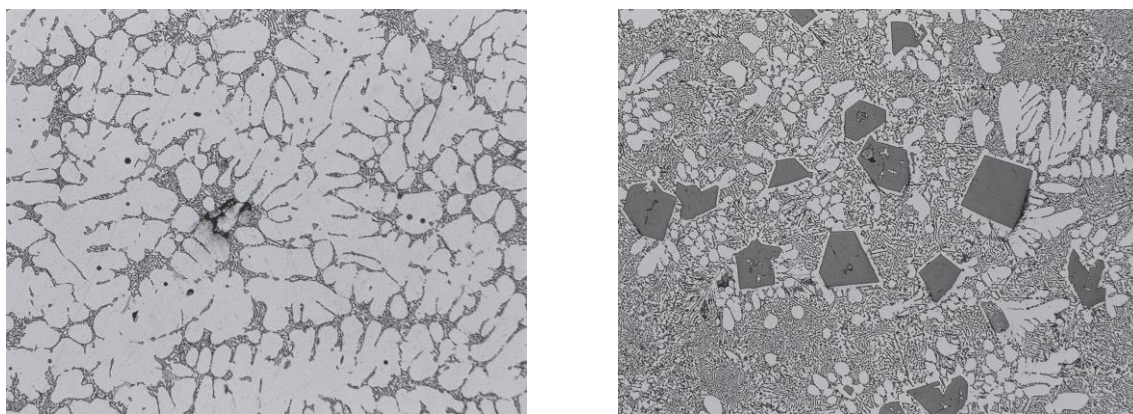
Zliatiny Al-Si, označované aj ako **silumíny**, patria medzi najdôležitejšie zlievarenské zliatiny. Hlavný legujúci prvok, kremík, zlepšuje predovšetkým technologické a mechanické vlastnosti čistého hliníka. Rozťažnosť kremíka počas kryštalizácie čiastočne kompenzuje zmršťovanie hliníka, čo znižuje tendenciu k tvorbe stiahnutí a spomínaných trhlín za tepla na odliatkoch. Tieto zlievarenské zliatiny sú aplikované pri požiadavkách na dobrú zlievateľnosť a zabiehavosť taveniny pri vyplňovaní formy, čo zabezpečuje eutektikum prítomné v ich štruktúre. Majú vysokú odolnosť voči korózii, sú ľahko zvariteľné, výborne pájkovateľné a sú vhodné na odlievanie aj tvarovo zložitých a tenkostenných odliatkov ako aj odliatkov väčších rozmerov. Komplex vlastností Al-Si odliatkov určuje predovšetkým ich primárna heterogénna dendritická štruktúra, tvorená tuhým roztokom, eutektikom a často krát aj časticami intermetalických fáz rôznej morfológie. Štruktúra je ovplyvňovaná chemickým zložením zliatiny, použitou technológiou tavenia a spôsobom odlievania.

Termodynamickú stabilitu a rovnovážne zloženie jednotlivých fáz v štruktúre odliatkov zliatin Al-Si určuje rovnovážny binárny diagram znázornený na Obr. 44. Ide o systém dvoch zložiek dokonale rozpustných v tekutom stave a jednostranne obmedzene rozpustných v tuhom stave (Al rozpúšťa Si obmedzene). Rozpustením kremíka v hliníku sa vytvára tuhý roztok α s maximálnou rozpustnosťou kremíka v hliníku 1,69 hm. % pri teplote 577 °C. Hliník sa v kremíku nerozpúšťa. Zložky Al a Si pri koncentrácii 11,74 hm. % Si a teplote 577 °C vytvárajú eutektikum, ktoré má veľmi dôležitý význam v štruktúre týchto zliatin, pretože má najnižšiu teplotu tavenia v tomto systéme. Zliatiny typu Al-Si, ktoré obsahujú menej ako 11,74 hm. % Si nazývame podeutektické, zliatiny s obsahom Si 11,74 hm. % nazývame eutektické a s obsahom Si nad 11,74 hm. % sú nadeutektické.



Obr. 44 Rovnovážny binárny diagram systému Al – Si.

Zliatiny do obsahu 1,69 hm. % Si tuhnú výlučne ako zliatiny bez prítomnosti eutektika v tuhom stave. Zliatiny s obsahom Si od 1,69 hm. % do 11,74 hm. % začínajú tuhnúť primárnou kryštalizáciou dendritov tuhého roztoku α a následne zvyšok taveniny tuhne ako eutektikum (mechanická zmes zložená z tuhého roztoku α a častíc eutektického kremíka). Podiel eutektika sa v podeutektických zliatinách so zvyšovaním koncentrácie Si zväčšuje až na 100 % pri 11,74 hm. % Si. Štruktúra zliatin Al-Si nadeutektickej koncentrácie je tvorená eutektikom a primárnymi kryštálmi kremíka. Mikroštruktúra podeutektického a nadeutektického silumínu je znázornená na Obr. 45. Najpoužívannejšie zlievarenské zliatiny Al-Si obsahujú 5 až 13 hm. % Si.

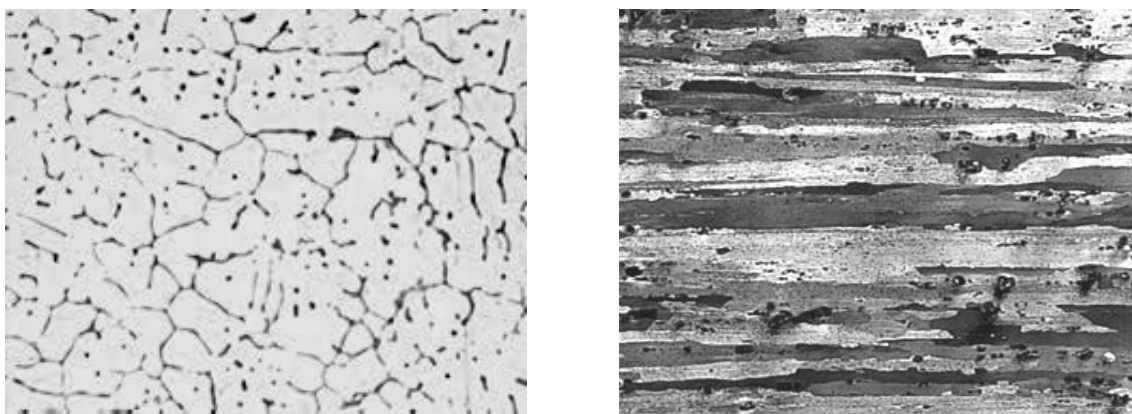


Obr. 45 Mikroštruktúra podeutektického a nadeutektického silumínu.

Morfológiu, resp. tvar častíc eutektického Si a následne aj mechanické vlastnosti odliatkov zliatin typu Al-Si je možné upravovať procesom označovaným ako *modifikácia*. Nemodifikované silumíny obsahujú eutektikum tvorené kremíkom pôvodnej doskovitej morfológie a modifikovaním nadobúdajú častice eutektického Si viac priaznivú tyčinkovitú až vláknitú morfológiu. Podstatou zmeny tvaru častíc je adsorpcia povrchovo aktívnych prvkov na povrchu rastúceho kryštálu eutektického kremíka. Jeho následný rast je obmedzený zabránením prísunu ďalších atómov Si z taveniny, čím dochádza k spomaleniu kryštalizácie eutektického kremíka. Ako modifikátory podeutektických Al-Si zliatin sa najčastejšie používajú stroncium a sodík.

Hliníkové zliatiny pre tvárnenie môžeme rozdeliť na dve skupiny: zliatiny používané v prirodzenom alebo žíhanom stave, teda *nevytvrditeľné* a zliatiny vhodné na vytvrdzovanie, teda *vytvrditeľné*. Tvárnené zliatiny nevytvrditeľné sa používajú predovšetkým v aplikáciách, kde nie je kladený dôraz na vyššie pevnostné charakteristiky (napr. Al-Mn, Al-Mg,...), naopak vytvrditeľné zliatiny sa používajú na namáhané konštrukčné a strojné komponenty (napr. Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg-Cu,...).

Predstaviteľom zliatin tohto typu sú zliatiny **Al-Cu-Mg**, označované aj ako **duraly**. Obsahy legúr v týchto zliatinách sa pohybujú v rozsahu 4,0 – 4,8 hm. % Cu, 0,4 – 1,8 hm. % Mg a do 1 hm. % Si (obsah Si závisí od obsahu Mg, ideálny pomer Mg : Si je 1,73). Mikroštruktúra duralov je z dôvodu prítomnosti viacerých legúr o rôznej koncentrácii pomerne zložitá. V liatom stave tejto zliatiny sa v mikroštruktúre nachádza fáza Al_2Cu , ktorá sa nachádza v medzidendritických priestoroch fázy α . Podiel eutektika je tým väčší, čím je vyšší obsah Cu a Mg v durale. Mikroštruktúra zliatiny Al-Cu-Mg po tvárnení a vytvrdzovaní je tvorená zrnami fázy α a časticami intermetalických fáz. Mikroštruktúry oboch stavov duralu sú na Obr. 46.



Obr. 46 Mikroštruktúra duralu v liatom stave a v stave po valcovaní.

Duraly, ako bolo už spomenuté, je možné za účelom zvýšenia pevnosti a tvrdosti tepelne spracovať **vytvrdzovaním**, ktoré tvoria tieto procesy: rozpúšťacie žihanie, kalenie a starnutie. *Rozpúšťacie žihanie* sa spravidla realizuje v rozsahu teplôt od 490 do 505 °C za účelom rozpustenia častíc obsahujúcich Cu a Mg v štruktúre formovaných počas kryštalizácie zliatiny na dosiahnutie vysokej a homogénnej koncentrácie legujúcich prvkov v tuhom roztoku. Nasleduje *kalenie*, zvyčajne rýchle ochladenie na izbovú teplotu, za účelom získania presýteného tuhého roztoku atómov rozpúšťajúcich prvkov. Následne sa realizuje *starnutie*, resp. precipitácia z presýteného tuhého roztoku, ktorá prebieha pri izbovej teplote (prirodzené starnutie) alebo pri zvýšenej teplote (umelé starnutie). V prvom štádiu starnutia dochádza k vzniku zhlukov atómov Cu, resp. Mg a Si v hliníkovej matici (označované ako Gunier-Prestonové zóny – GP zóny), ktoré sa následné v ďalších štádiách transformujú na koherentné, semikoherentné až nekoherentné precipitáty rovnovážnych fáz Al_2Cu , resp. Mg_2Si . Maximálny vytvrdzujúci účinok majú koherentné a semikoherenté precipitáty.

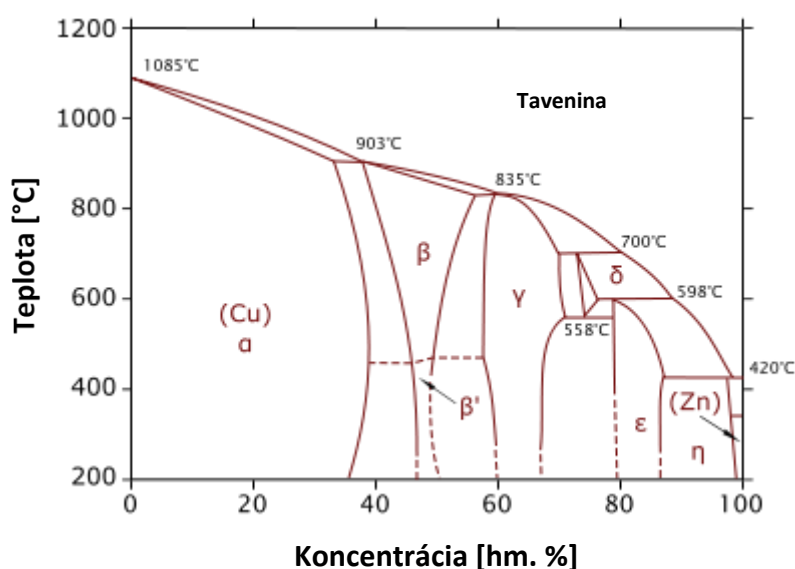
Meď a jej zliatiny

Čistá meď má výbornú elektrickú a tepelnú vodivosť a dobrú odolnosť voči korózii. Má pomerne nízku pevnosť, ale vysokú plasticitu. Negatívny vplyv na jej vlastnosti má predovšetkým kyslík. Preto je nutné obsah kyslíka v čistej medi minimalizovať. V praxi sa čistá meď používa najčastejšie po deformácii za studena a následnom rekryštalizačnom žíhaní, kedy je štruktúra tvorená polyedrickými zrnami s prítomnými dvojčatami.

Zliatiny medi vznikajú legovaním chemickými prvkami a podľa chemického zloženia ich rozdeľujeme na *mosadze* (zliatiny medi so zinkom) a *bronzy* (zliatiny medi

s cínom alebo inými prvkami, podľa ktorých aj bronzy označujeme – cínové bronzy, hliníkové bronzy,...).

Mosadze sú binárne alebo viackomponentné zliatiny Cu s hlavným legujúcim prvkom Zn. Štruktúra mosadzí a taktiež ich mechanické vlastnosti sú závislé od obsahu legujúcich prvkov. Na Obr. 47 je znázornený rovnovážny binárny diagram systému Cu – Zn, z ktorého je jasné, že meď so zinkom vytvára viacero fáz. Fáza α je substitučný tuhý roztok zinku v medi s mriežkou K12 a maximálnou rozpustnosťou 39 hm. % Zn v Cu pri teplote 454 °C. Fáza β je neusporiadaný tuhý roztok elektrónovej zlúčeniny CuZn s mriežkou K8, fáza β' je usporiadaný tuhý roztok. K usporiadaniu atómov v štruktúre dochádza v rozmedzí teplôt 454 – 468 °C, čo má za následok zmenu plastickej β fázy na krehkú a tvrdú β' fázu. Fáza γ je tuhým roztokom elektrónovej zlúčeniny Cu₅Zn₈ so zložitou kubickou mriežkou, je krehká a nežiaduca v technických mosadziach, ktoré obsahujú do 50 hm. % Zn.



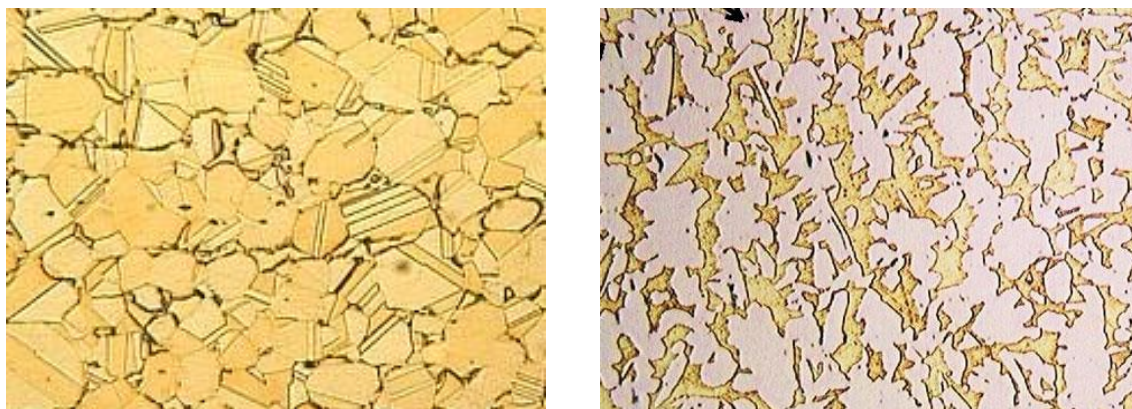
Obr. 47 Rovnovážny binárny diagram systému Cu – Zn.

V závislosti od obsahu Zn a podľa štruktúry rozdeľujeme technické mosadze na α -mosadze a $\alpha+\beta'$ -mosadze.

α -mosadze sú jednofázové zliatiny Cu a Zn. V liatom stave majú tieto zliatiny dendritickú štruktúru, po tvárnení a vyžihnutí majú homogénnu polyedrickú štruktúru. Sú dobre tvárne za nízkych aj za vysokých teplôt. Mechanické vlastnosti týchto mosadzí sa zvyšujú so zvyšujúcim sa obsahom Zn do obsahu 39 hm. % Zn.

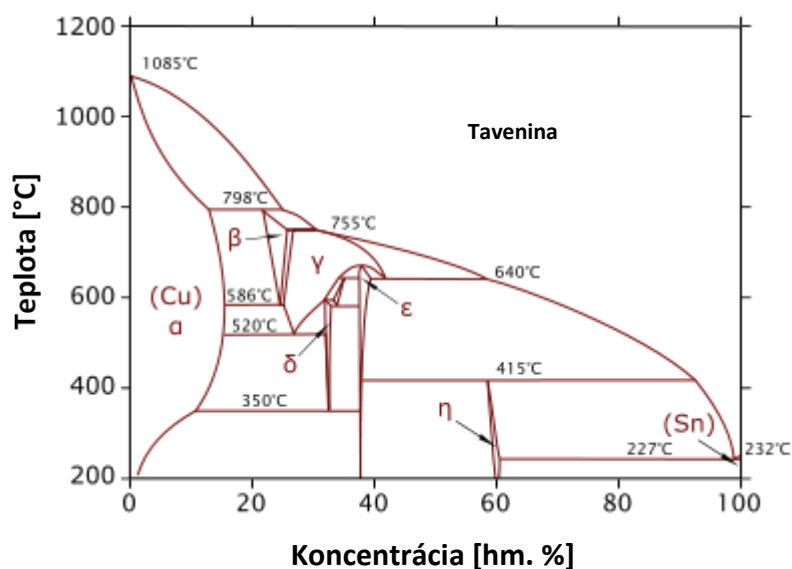
$\alpha+\beta'$ -mosadze sú dvojfázové zliatiny Cu a Zn. V liatom stave je ich štruktúra heterogénna dendritická, v stave po tvárnení a žíhaní je štruktúra heterogénna polyedrická tvorená zrnami α fázy a zrnami β' fázy. Tieto mosadze v porovnaní s jednofázovými dosahujú vyššiu pevnosť (najvyššia pri obsahu 45 hm. % Zn), avšak sa vyznačujú nižšou húževnatosťou.

Mikroštruktúra jednofázovej a dvojfázovej mosadze je na Obr. 48.



Obr. 48 Mikroštruktúra jednofázovej a dvojfázovej mosadze.

Mosadze sa označujú písmenami Ms a číslom, ktoré vyjadruje množstvo medi v percentách v týchto zliatinách. Mosadze z hľadiska technologického spracovania rozdeľujeme na mosadze pre tvárnenie (napr. Ms 70, Ms 68, Ms 63, Ms 60, Ms 58) a mosadze pre odlievanie (napr. Ms 60, Ms 58).



Obr. 49 Rovnovážny binárny diagram systému Cu – Sn.

Cínové bronzy sú binárne alebo viackomponentné zliatiny medi s cínom, pre ktoré platí, že súčet obsahov Cu a Sn musí byť najmenej 99 hm. %. Na **Obr. 49** je znázornený rovnovážny binárny diagram systému Cu – Sn. Ide o pomerne zložitý systém s viacerými peritektickými premenami a premenami eutektoidného typu s prítomnou α fázou, ktorá predstavuje substitučný tuhý roztok cínu v medi s mriežkou K12, β fázou, ktorá predstavuje tuhý roztok elektrónovej zlúčeniny Cu_5Sn s mriežkou K8 a γ , δ a ϵ fázami, ktoré predstavujú tuhé roztoky elektrónových zlúčenín.

Technické a praktické využitie cínových bronzov pre tvárnenie je do obsahu 10 – 12 hm. % Sn. Často používané cínové bronz s obsahom 4 až 5 hm. % Sn majú po deformácii za studena a následnom žíhaní polyedrickú štruktúru tvorenú fázou α . Zliatiny s vyšším obsahom cínu sú zlievarenskými zliatinami a vyznačujú sa krehkosťou. V liatom stave majú tieto zliatiny štruktúru tvorenú $\alpha + \delta$ fázou. Pri vyšších obsahoch Sn je štruktúra bronzov v nerovnovážnom stave tvorená tuhým roztokom α a eutektoidom vo forme ($\alpha + \delta$). Eutektoid obsahujúci krehkú fázu δ nepriaznivo pôsobí na mechanické vlastnosti týchto bronzov.

Úlohy cvičenia

1. Nakreslite a popíšte štruktúru: α mosadze v tvárnenom stave a $\alpha + \beta'$ mosadze v liatom a tvárnenom stave.
2. Nakreslite a popíšte štruktúru a krivku ochladzovania podeutektického a nadeutektického nemodifikovaného silumínu.
3. Nakreslite štruktúru modifikovaného silumínu a vysvetlite vplyv modifikovania na štruktúru.
4. Znázornite štruktúru duralu v liatom a tiež v lisovanom stave po tepelnom spracovaní. Popíšte rozdiel medzi nimi.

ŠTRUKTÚRA A VLASTNOSTI PLASTOV, KERAMIKY A KOMPOZITOV

Cieľ cvičenia

Oboznámiť sa so štruktúrou plastov, keramiky a kompozitov a určiť faktory vplývajúce na výsledné mechanické vlastnosti týchto materiálov.

Plasty

Pod pojmom **plasty** rozumieme materiály, ktorých podstatu tvoria makromolekulové látky (polyméry), ktoré možno formovať teplom alebo tlakom, prípadne oboma činiteľmi súčasne. Polyméry alebo makromolekulové látky sú organické alebo anorganické zlúčeniny tvorené stovkami až miliónmi atómami navzájom spojenými chemickými väzbami. Zoskupenie atómov v makromolekule má svoje stavebné zákonitosti. Podľa nich je väčšina prírodných a syntetických polymérov vybudovaná tak, že sa v ich reťazcoch pravidelne opakuje určitá stavebná alebo štruktúrna jednotka.

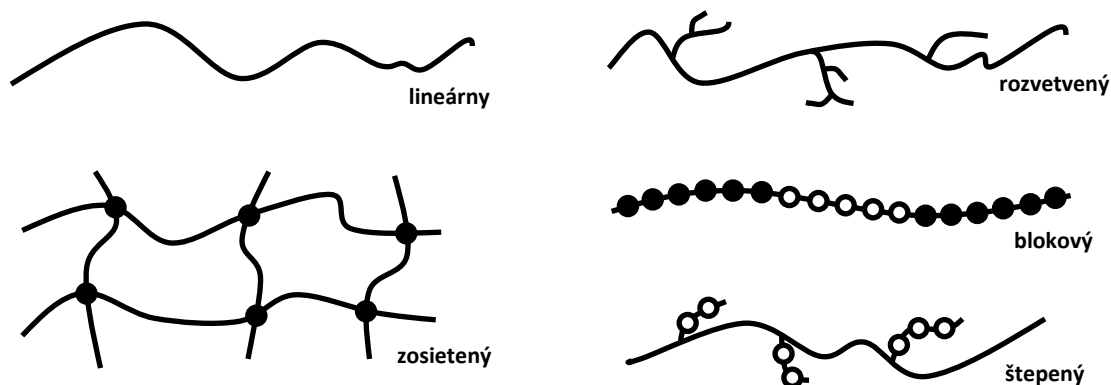
Stavebná jednotka, teda *mér* je časť molekuly zodpovedajúca nízkomolekulovej látke, z ktorej molekula vznikla, alebo mohla vzniknúť. Je v priamom vzťahu k východiskovej surovine, k *monoméru*, ktorý sa použil na syntézu *polyméru*.

Štruktúrna jednotka je najmenšie zoskupenie atómov v molekule, ktoré sa v nej periodicky opakuje. Štruktúrna jednotka môže byť identická so stavebnou jednotkou (napr. pri polyvinylchloride), niekedy jednu stavebnú jednotku tvorí viac štruktúrnych jednotiek (napr. stavebná jednotka polyetylénu je vytvorená z dvoch metylénových štruktúrnych jednotiek) a niekedy jednu štruktúrnú jednotku môže vytvárať niekoľko stavebných jednotiek (napr. dve stavebné jednotky dikarboxylová kyselina a diamín vytvárajú jednu štruktúrnú jednotku polyamidu).

Teda polymérne reťazce je možné opísať opakujúcou sa štruktúrnou jednotkou. Molekuly zložené z chemicky rovnakých jednotiek sa nazývajú *homopolyméry*. Keď reťazec je zložený z viac druhov opakujúcich sa jednotiek je označovaný ako *kopolymér*.

Na

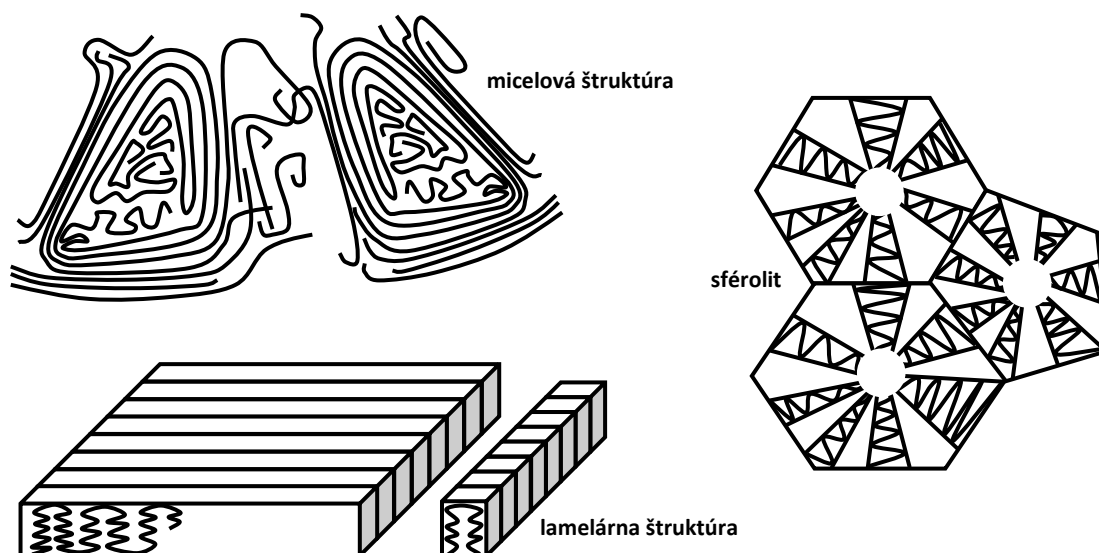
Obr. 50 sú schematicky znázornené niektoré prípady **makroštruktúry reťazcov**. Najjednoduchším polymérom je lineárny homopolymér, reťazce polymérov môžu byť aj viac alebo menej rozvetvené – rozvetvený homopolymér. Pri polyméroch pripravených z dvoch monomérov existuje lineárny kopolymér, buď alternujúci, štatistický alebo blokový a pri rozvetvených kopolyméroch existuje aj štepený (očkovaný) kopolymér. Najzložitejšia konfigurácia je v prípade zosietených polymérov so zosietenou štruktúrou.



Obr. 50 Niektoré prípady makroštruktúry reťazcov polymérov.

Štruktúra polymérov je predovšetkým závislá od *chemického zloženia základných častíc*, ktoré sa neustále v makromolekule opakujú, od *molekulej hmotnosti a jej distribúcie*, od *konfigurácie polymérov*, teda od priestorového usporiadania ich makromolekúl, od *konformácie polymérov*, teda od schopnosti rotácie častí molekúl okolo jednoduchých väzieb, od *tvaru makromolekúl* a pod. Tuhé polyméry spravidla nie sú homogénnym kontinuom, ale mikroheterogénnym systémom, tvoreným mikroštruktúrami s rozdielnymi fyzikálnymi vlastnosťami. Súbor charakteristických jednotiek, ktoré vytvárajú daný systém sa označuje ako **nadmolekulová štruktúra**, ktorá výrazne ovplyvňuje fyzikálne, mechanické, technologické a iné vlastnosti polymérov.

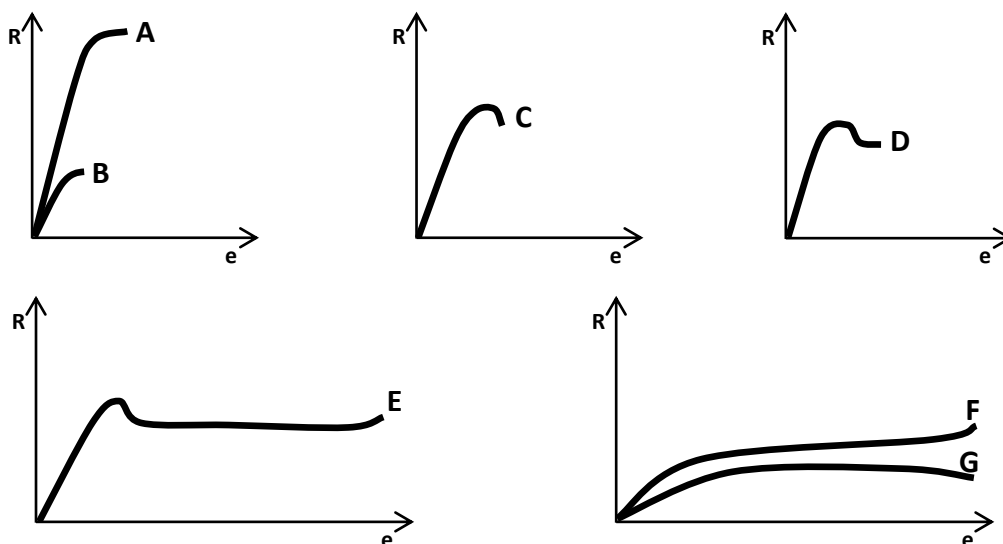
Na Obr. 51 sú schematicky znázornené niektoré prípady nadmolekulovej štruktúry polymérov. Jednou z možností makromolekulovej štruktúry polymérov je amorfná štruktúra. Polyméry s takouto štruktúrou nevykazujú štruktúrne usporiadanie medzi reťazcami makromolekúl. Niektoré polyméry sú naopak čiastočne kryštalické, no na rozdiel od kovov a nízkomolekulových látok nie je možné pripraviť polymér s úplne kryštalickou štruktúrou. Do tejto skupiny patria *polyméry s micelovou štruktúrou* (s náhodnou distribúciou kryštalických a amorfných oblastí), *s lamelárnou štruktúrou* (tvorenou lamelami monokryštálov s amorfným podielom v mieste ohybov, defektov a koncov reťazcov), *s polykryštalickou štruktúrou* (tzv. sférolity, polyméry s nedokonale vyvinutou lamelárnou štruktúrou), *s fibrilárnou kryštalovou štruktúrou* (tzv. fibrily s dvojitou štruktúrou). Ďalšou z možných nadmolekulových štruktúr polymérov je trojrozmerná sieť zosieteného polyméru typická pre kaučuky vznikajúca procesom vulkanizovania (vzniká pri tom guma).



Obr. 51 Niektoré prípady nadmolekulovej štruktúry polymérov.

Čisté polyméry, čiže jednozložkové plasty sa ako technické materiály používajú v obmedzenom rozsahu, ale nie zanedbateľne. Plasty sú obvykle viaczložkové konštrukčné a technické materiály. Obsahujú prídavné látky, resp. prísady ako sú napríklad stabilizátory polymérov, farbivá (pigmenty) a pod.

Mechanické vlastnosti plastov sú predovšetkým závislé od ich chemického zloženia a štruktúry, no hlavne od teploty skúšania. Na Obr. 52 sú znázornené ťahové diagramy plastov, na základe ktorých možno definovať ich správanie pri statickom namáhaní ťahom pri izbovej teplote. Závislosť A je typická pre vystužené plasty. Pre amorfné trojrozmerné polyméry (živice) v sklovitom stave je charakteristická závislosť B. Amorfné lineárne polyméry sa deformujú podľa závislosti B, C, D, E. Pre sklovitý stav a vyššiu rýchlosť deformácie sú charakteristické krivky B a C, pre menšiu rýchlosť deformácie krivky C, D a E. Pre kaučukovitý stav a elastoméry sú pre malé rýchlosti deformácie charakteristické krivky F a G. Krivka F je charakteristická pre kryštalizujúce a krivka G pre nekryštalizujúce kaučuky. Tieto deformačné krivky sa však môžu meniť v širokom rozsahu v závislosti od rýchlosti deformácie a teploty.



Obr. 52 Charakteristické ťahové diagramy rôznych druhov polymérov.

Pre plasty je charakteristická existencia *teploty sklovitého prechodu* T_g . Pri teplotách značne pod T_g (krivka A a B) sa plast podobá sklu a v tomto prípade nastáva krehké porušenie pri deformácii cca 10 %. Pri teplote o niečo nižšej ako T_g (krivka C) je ťahový diagram plastov podobný ako pri tvárných kovoch. Tesne pod teplotou T_g (krivka D a E) je charakteristická výrazná medza klzu, kedy plasty môžu vykazovať už vysoké plastické charakteristiky. Pri teplote značne vyššej ako T_g sa plasty správajú ako kaučuk (krivka F a G) a v tomto prípade nastáva porušenie až pri veľkých deformáciách 300 – 1000 %.

Použitie plastov v technickej praxi je veľmi široké a udávajú ho predovšetkým ich vlastnosti. Dôležitý aspekt pri používaní plastov je ich správanie sa za tepla. Podľa toho ich rozdeľujeme na **termoplasty** (plastoméry), ktoré sa účinkom tepla stávajú plastické, tvarovateľné a po ochladení opäť stvrdnú a nadobudnú želaný tvar, ohrev, tvarovanie a ochladenie možno pri nich opakovať bez zmeny vlastností materiálu a na **reaktoplasty** (duroméry, termosety), ktoré sa teplom chemicky menia, po ohriatí sú prechodne tvarovateľné, kedy ich možno prechodne rôznymi spôsobmi spracovávať a tvarovať a po ďalšom vytvrdení svoju plasticitu strácajú, ďalším ohriatím svoj tvar nemenia a nedajú sa formovať. Poznáme aj **elastoméry**, polyméry v samostatnej skupine, ktoré sa vyznačujú mimoriadnou pružnosťou a malou tuhosťou. Patrí tu prírodný kaučuk, syntetické kaučuky, guma a pod.

Konštrukčná keramika

Konštrukčné keramické materiály boli a sú vyvíjané pre aplikácie v rôznych podmienkach, hlavne v elektrotechnike, strojárstve, v chemickom, energetickom leteckom a automobilovom priemysle a pod. Podľa spôsobu aplikácie môžeme konštrukčné keramické materiály rozdeliť na materiály pre nízкотеплотné a vysokотеплотné aplikácie. Podľa štruktúry ich delíme na *monolitné* a *kompozitné*. Hlavnými konštrukčnými keramickými materiálmi sú materiály na báze Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 , SiC a SiAlON .

Atraktivita konštrukčnej keramiky je založená na medziatómových väzbách prvkov a zložiek, z ktorých je vyrobená. Priame väzby kovalentného charakteru medzi prvkami prítomnými v týchto materiáloch zaručujú vynikajúcu tepelnú odolnosť, t.j. vysoký bod tavenia alebo rozkladu, vysoký alebo veľmi vysoký modul pružnosti, aj vysokú tvrdosť a oteruvzdornosť. Väčšina druhov konštrukčnej keramiky pozostáva z ľahkých prvkov, ako sú bór, uhlík, hliník, kremík, kyslík a dusík, čoho dôsledkom je nízka špecifická hmotnosť týchto materiálov. Atómové väzby sú aj dôvodom ich výbornej odolnosti voči korózii. Avšak keramické materiály sa vo všeobecnosti vyznačujú nízkou húževnatosťou (pri izbovej teplote je plastická deformácia týchto materiálov takmer nemožná) a sú veľmi citlivé na prítomné defekty a trhliny, preto je nevyhnutné pozitívne ovplyvňovať mikroštruktúru konštrukčnej keramiky.

Konštrukčné keramické materiály, podobne ako kovy, sú spravidla materiálmi s pravidelným usporiadaním atómov na dlhú vzdialenosť v prípade kryštalických keramik alebo s pravidelným usporiadaním atómov na krátku vzdialenosť v prípade amorfných. Pri hodnotení štruktúr keramických materiálov sa najčastejšie vyhodnocuje morfológia, rozmery a objemový podiel jednotlivých fáz alebo pórov. Väzba medzi jednotlivými atómami v štruktúre konštrukčnej keramiky môže byť iónová alebo kovalentná.

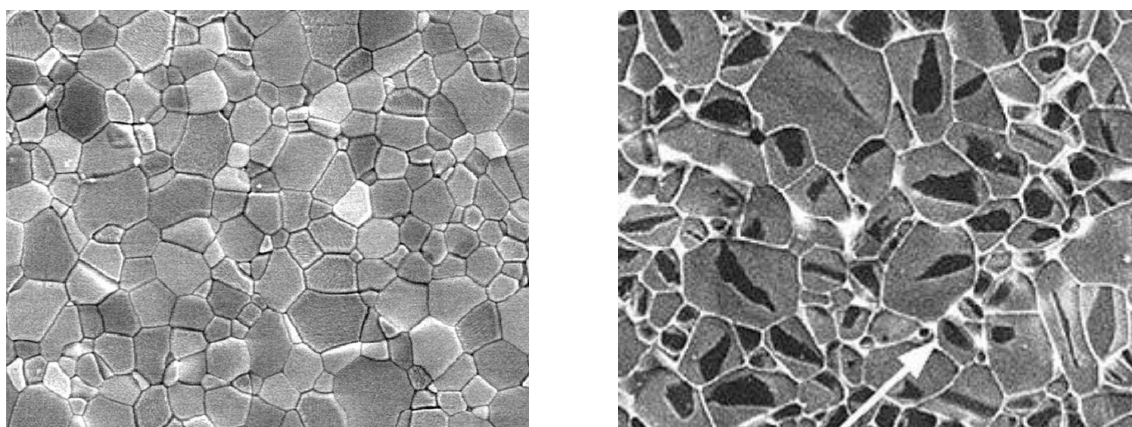
Iónová keramika pozostáva z kovu a nekovu, ako napr. MgO , Al_2O_3 , ZrO_2 . Kovy a nekovy sú nositeľmi protikladných elektrických nábojov a väzby medzi nimi sú tvorené elektrostatickými silami medzi týmito nábojmi. Inými slovami väzba vzniká interakciou atómov s nízkou ionizačnou energiou (ľahko strácajú elektróny) s atómami s vysokou elektrónovou afinitou a týmto odovzdávaním a prijímaním elektrónov vznikajú anióny a katióny.

Kovalentné keramické systémy sa od predchádzajúcich líšia tým, že pozostávajú z dvoch nekovov, resp. polokovov ako napríklad SiO_2 , SiC , Si_3N_4 alebo len z čistých prvkov ako napríklad diamant. V tejto skupine keramik sa väzba vytvára vzájomným prepožičiavaním valenčných elektrónov so susednými atómami, čo vedie k vzniku usmernených väzieb. Tak vzniká stabilná konfigurácia valenčných sfér, valenčné

elektróny sú súčasťou elektrónového obalu viacerým atómom, pričom nevznikajú ióny, ale atómy sú elektricky neutrálne.

Konštrukčné keramické materiály sú vyrábané progresívnymi výrobnými technológiami, ktoré zahrňujú výrobu práškov, ich mletie, miešanie, formovanie, spekanie a finálne opracovanie. Každá z týchto operácií má v sebe možný zdroj vzniku defektov, pričom parametre východiskových práškov a parametre zhutnenia určujú štrukturálne charakteristiky keramiky. Technologické defekty, mikroštrukturálne nehomogenity a mikroštrukturálne parametre výrazne ovplyvňujú celý súbor vlastností konštrukčných keramik.

Obr. 53 znázorňuje mikroštruktúru iónového keramického materiálu zo spekaného Al_2O_3 a kovalentného keramického materiálu SiC s vylúčenou sekundárnou fázou na hraniciach zrn.



Obr. 53 Mikroštruktúra keramického materiálu na báze Al_2O_3 a na báze SiC.

Štrukturálne charakteristiky konštrukčnej keramiky sa študujú pomocou svetelných a elektrónových mikroskopov, obdobne ako v prípade kovov, po ich brúsení, leštení a leptaní. Hodnotia sa predovšetkým defekty, štrukturálne heterogenity, morfológia zrn a ich stredná veľkosť, podiel fáz a pod.

Kompozitné materiály

Kompozity sú materiály vytvorené dvoma alebo viacerými chemicky a fyzikálne odlišnými komponentmi (matrica a spevňujúca fáza) oddelenými od seba výraznou hranicou. Takýto zložený materiál sa vyznačuje vlastnosťami, ktorými nedisponuje ani

jeden z použitých komponentov. Kompozitné materiály sú náročnejšie na výrobu v porovnaní s bežnými materiálmi, ale vďaka ich unikátnym vlastnostiam (vysoká špecifická pevnosť, modul pružnosti apod.) sú čoraz častejšie využívaným materiálom v praxi.

Najdôležitejším komponentom v kompozitných materiáloch je **matrica**, ktorej hlavnou úlohou je v kompozite prenášať vonkajšie zaťaženia a distribuovať ich do celého objemu materiálu. Matricou kompozitného materiálu môžu byť plasty, kovy, keramika a uhlík.

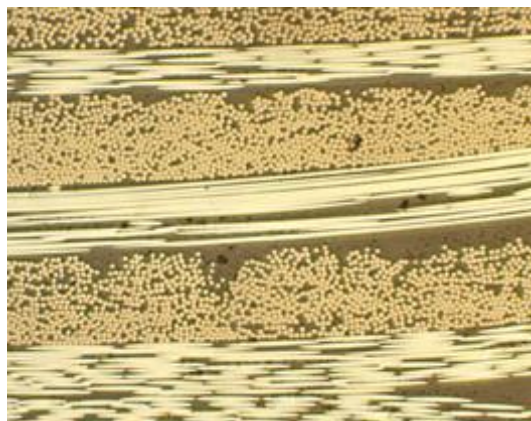
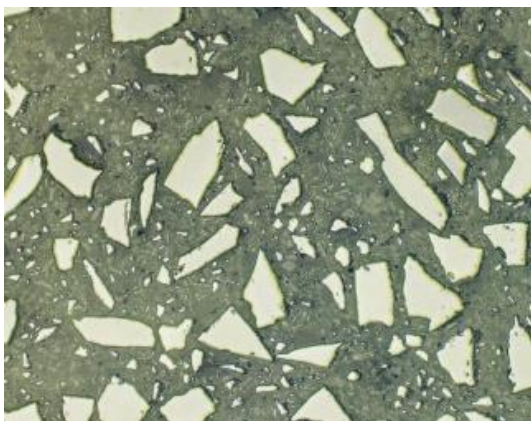
Dôležitú úlohu v kompozitných materiáloch zohrávajú aj **spevňujúce fázy**, ktoré môžu byť v podobe vlákien, whiskrov, častíc rôznej morfológie, resp. ich kombináciou. Volia sa predovšetkým v závislosti od požadovaných vlastností kompozitného materiálu. Spevňujúca fáza môže byť v matici distribuovaná pravidelne alebo náhodne a poznáme *kompozity disperzne spevnené, zrnité, vláknové a laminárne*.

V prípade použitia **vlákien** ako spevňujúcej fázy poznáme *kompozity s kovovými vláknami* (oceľové, wolfrámové, molybdénové, berýliové, hliníkové, titánové), *s keramickými vláknami* (sklenené, uhlíkové, bórové, grafitové, vlákna oxidov a karbidov) a *polymerovými vláknami* (aramidové, kevlarové). Všeobecne platí, že dlhšie a tenšie vlákno efektívnejšie spevňuje kompozitný materiál.

Častice majú rozmery veľmi podobné vo všetkých smeroch a dosahujú veľkosť mikrometrov. Pevnosť časticových kompozitných materiálov závisí predovšetkým od priemernej veľkosti častíc a ich objemového podielu.

Whiskre sú definované ako krátke tenké monokryštály s pomerom dĺžky k šírke väčším ako 20. Používajú sa najčastejšie o priemere 1 μm a dĺžky do 4 mm. Majú vysokú pevnosť, často vysokú teplotu tavenia, dokonalú štruktúru a povrch a pridávajú sa najčastejšie do keramických matric za účelom zvýšenia húževnatosti. V súčasnosti sa najčastejšie používajú SiC whiskre.

Na Obr. 54 je znázornená mikroštruktúra časticového kompozitu (SiC častice v hliníkovej matici) a vláknového kompozitu (uhlíkové vlákna v polymérovej matici).



Obr. 54 Mikroštruktúra časticového a vláknového kompozitu.

Úlohy cvičenia

1. Vyhodnoťte mechanické vlastnosti polyméru pod obchodným označením Silamid Nylon 6 zo záznamu statickej skúšky ťahom a porovnajte vplyv jednotlivých aditív na jeho pevnostné a plastické charakteristiky.
2. Nakreslite a popíšte štruktúru kompozitu zloženého z hliníkovej matrice a SiC častíc.
3. Nakreslite a popíšte štruktúru keramického materiálu.