



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Lenka Michnová

Úvod do metalografie

Metodická příručka

Ing. Lenka Michnová
Úvod do metalografie
Metodická příručka

Vydalo
Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i. , Praha, 2015

Návrh obálky
Radka Šebková

Číslo projektu
CZ.1.07/2.3.00/45.00 29

Publikace vznikla jako výsledek projektu Věda pro život, život pro vědu (VĚŽ).
Projekt byl řešen v rámci programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost, prioritní osa Terciární vzdělávání, výzkum a vývoj, v období březen 2014 až červen 2015.



ISBN 978-80-86302-71-3

Úvod do metalografie



CÍLE

vnitřní stavba kovů, krystalizace slitin, postupy v metalografii

OBSAH

1. Úvod
2. Vnitřní stavba kovů
3. Krystalizace čistých kovů a slitin
4. Poruchy krystalové mřížky
5. Mechanizmy difuze v tuhém stavu
6. Tuhé roztoky ve slitinách
7. Příprava vzorků pro pozorování struktury



KLÍČOVÁ SLOVA

krystalová mřížka, poruchy krystalové mřížky, difuze, krystalizace, krystalizační zárodek, krystal, difuze, mechanismy difuze, metalografie, příprava vzorků, výbrus



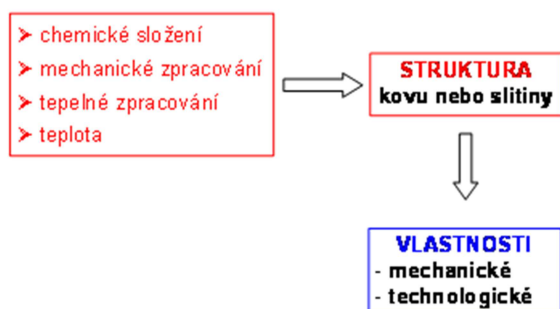
ODKAZY NA LITERATURU



MÍSTO PRO DOPLNĚNÍ

1. ÚVOD

Metalografie je nauka, která se zabývá pozorováním a zkoumáním vnitřní stavby (struktury) kovů a slitin. Vnitřní stavba kovových materiálů má přímý vliv na jejich fyzikální, mechanické a technologické vlastnosti. Struktura kovů a slitin závisí od chemického složení, mechanického zpracování (tváření), tepelného zpracování (kalení, žíhání apod.) a teploty (viz obr. 1).



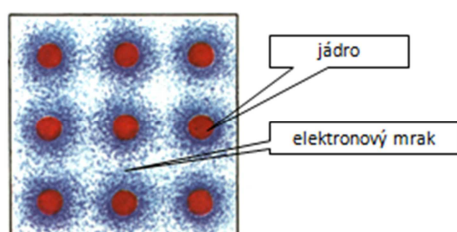
Obr. 1 Vlivy na strukturu kovových materiálů

Obsahem metalografie je:

- tuhnutí kovů a vznik slitin,
- podmínky vzniku struktury,
- pozorování a zkoumání struktury,
- změny struktury,
- vliv struktury na vlastnosti kovů.

2. Vnitřní stavba kovů

Všechny věci kolem nás jsou tvořeny prvky, které jsou seřazeny v periodické soustavě prvků. Tuto soustavu vytvořil D. I. Mendělejev v roce 1869. Každý prvek je v tabulce označen chemickým symbolem, který je odvozen z latinského názvu, např. hliník - Al (lat. *Aluminium*), měď - Cu (*Cuprum*), kyslík - O (*Oxygenium*) apod. Atomy prvků jsou tvořeny jádrem a elektronovým obalem. V jádře se nacházejí dva typy částic - protony a neutrony, v obalu elektrony. U kovových materiálů je mezi atomy kovová vazba. Schematické znázornění kovové vazby je na obr. 2.



Obr. 2 Kovové kationty a elektronový mrak [1]

Kovová vazba mezi atomy vzniká v pevném (tuhém) skupenství. Je charakteristická tím, že atomy tvoří vazebné elektronové páry a **valenční elektrony** přísluší všem atomům krystalu současně, čímž vytvářejí tzv. elektronový mrak. Důsledkem kovové vazby je tepelná a elektrická vodivost, plasticita a houževnatost.

Atomy kovových prvků jsou v prostoru pravidelně uspořádány a kmitají kolem svých poloh. V tuhém stavu vytvářejí krystaly, ve kterých se opakuje jejich rozložení pravidelně ve třech směrech (osy x, y, z).



Obr. 3 Přírodní krystal křemene [2]

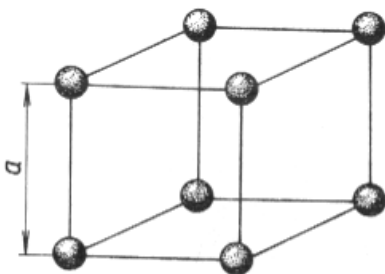


Obr. 4 Krystal kamenné soli (halit) [3]

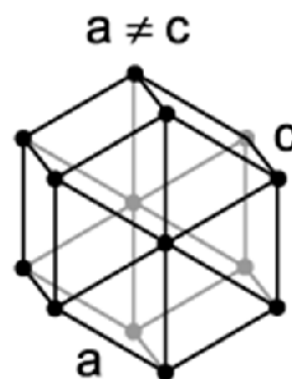
Pro popis krystalu se využívá prostorová krystalová mřížka. Elementární krystalová mřížka (buňka) je nejmenší část prostorové krystalové mřížky, ve které se projevuje zákonitost celé stavby krystalu. Krystalové mřížky se odlišují tvarem elementární mřížky, tj. rozměry, polohami částic apod. Podle tvaru elementární buňky se rozlišují krystalografické soustavy. Kovy krystalizují v krystalografických soustavách:

- kubické (krychlové),
- hexagonální (šesterečné).

Každá elementární buňka je charakterizovaná mřížkovou konstantou, která udává vzdálenost dvou sousedních atomů. Na obr. 5 a 6 jsou schematicky znázorněny prostá kubická a prostá hexagonální krystalová mřížka.

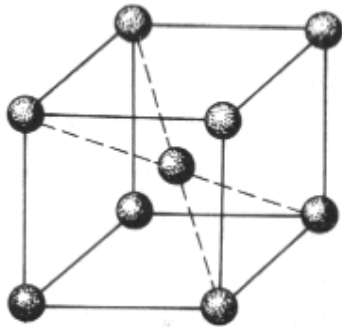


Obr. 5 Schéma elementární prosté kubické krychlové mřížky [4]

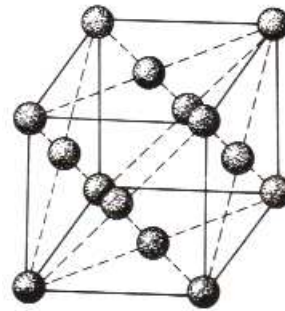


Obr. 6 Schéma elementární prosté hexagonální mřížky [5]

V praktických podmínkách kovy krystalizují v kubické objemově centrované mřížce (K8), kubické plošně centrované mřížce (viz obr. 7 a 8). Kubická objemově centrovaná mřížka je tvořena osmi atomy v rozích krychle a jedním atomem uprostřed mřížky. Kovy jako chrom (Cr), molybden (Mo), vanad (V) atd., které krystalizují v této soustavě, mají malou plasticitu. Kubická objemově centrovaná mřížka je tvořena 14 atomy, osm atomů je v rozích krychle a v každé její stěně je po jednom atomu. Kovy krystalizující v této soustavě, např. hliník (Al), stříbro (Ag), zlato (Au), měď (Cu) apod., jsou velmi plastické.

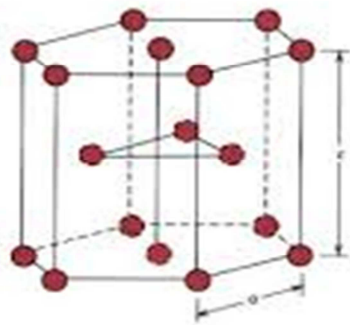


Obr. 7 Schéma elementární objemově středěné kubické krychlové mřížky [4]



Obr. 8 Schéma elementární plošně středěné kubické krychlové mřížky [4]

Hexagonální mřížku u kovů tvoří 17 atomů. Dvanáct atomů je v rozích šestibokého hranolu, dva atomy ve středu obou základů a tři atomy uvnitř mřížky viz obr. 9.



Obr. 9 Schéma hexagonální mřížky [6]



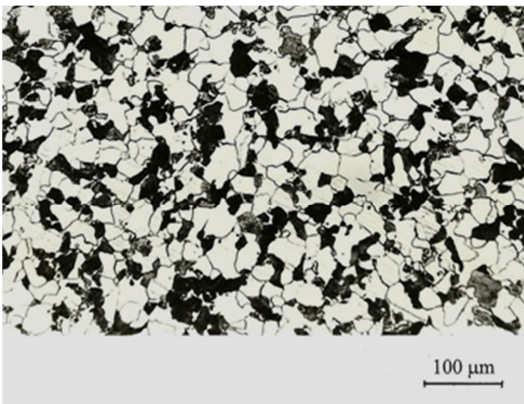
Pojmem monokrystal je označována látka, která je tvořena jedním krystalem dokonalého tvaru. Polykrystal je látka tvořena větším počtem krystalů a krystalit látka tvořena větším počtem krystalů nedokonalého tvaru, u kterých se vyskytují mřížkové poruchy.

3. Krystalizace čistých kovů a slitin

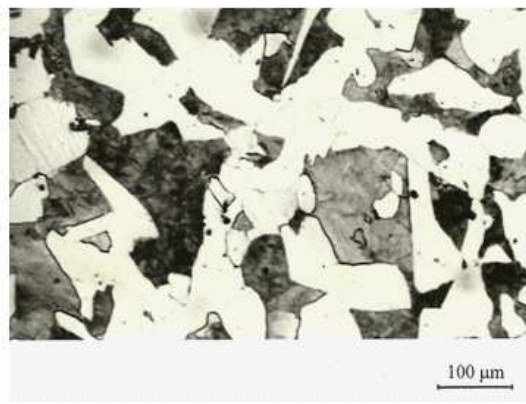
V metalografii se pojmem krystalizace označuje jev, při kterém kov přechází z kapalného stavu (z taveniny) do stavu tuhého (pevného). Tento děj se odehrává ve dvou etapách:

- vznik zárodků krystalů,
- růst krystalů.

Důležitými parametry, které ovlivňují tvar struktury v tuhém stavu, je rychlost vzniku zárodků v_z a rychlost růstu zárodků v_r . Když je rychlost vzniku zárodků v_z větší než rychlost jejich růstu v_r , vzniká struktura jemnozrná. Materiál s jemnozrnou strukturou vykazuje vyšší pevnost a houževnatost.

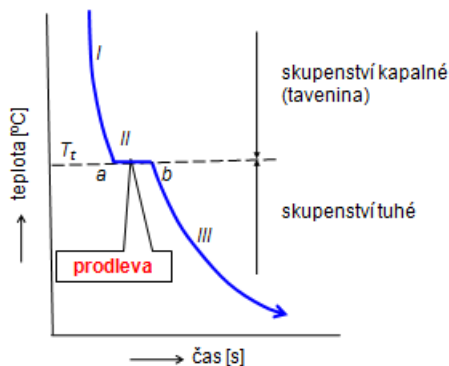


Obr. 10 Jemnozrná struktura oceli

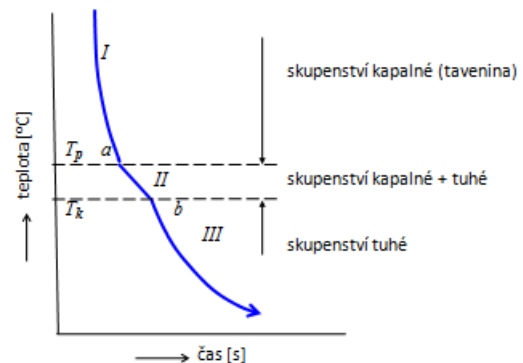


Obr. 11 Hrubozrná struktura oceli

Čisté kovy krystalizují při konstantní teplotě, která se nazývá teplotou tuhnutí. Je to fyzikální veličina a její hodnota se u jednotlivých kovů liší, např. teplota tuhnutí železa (Fe) je 1 538 °C, hliníku (Al) 660 °C, mědi (Cu) 1 083 °C atd. Krystalizace probíhá v časovém intervalu. Na obr. 12 je křivka chladnutí čistého kovu. Bod **a** na křivce chladnutí odpovídá době počátku krystalizace, kdy se v tavenině vytvoří zárodky krystalů. Bod **b** označuje konec krystalizace.



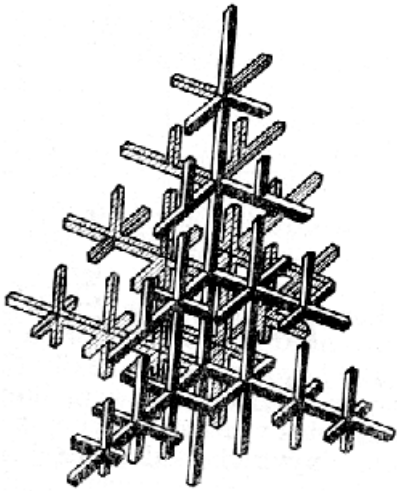
Obr. 12 Křivka chladnutí čistého kovu



Obr. 13 Křivka chladnutí slitiny

U slitin dochází ke krystalizaci v intervalu tuhnutí, tj. v rozmezí teplot. Na obr. 13 je křivka chladnutí slitiny. Teploty počátku T_p a konce krystalizace T_k závisejí na chemickém složení slitiny.

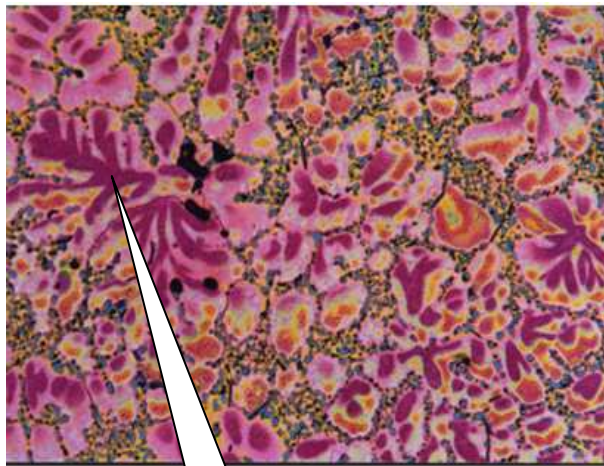
Při krystalizaci taveniny dochází k růstu krystalů. Tyto tvoří v tzv. litém stavu dendritickou strukturu (dendron řec. *strom*). Na obr. 15, 16 a 17 jsou dendritické struktury různých slitin.



Obr. 14 Dendrit [5]

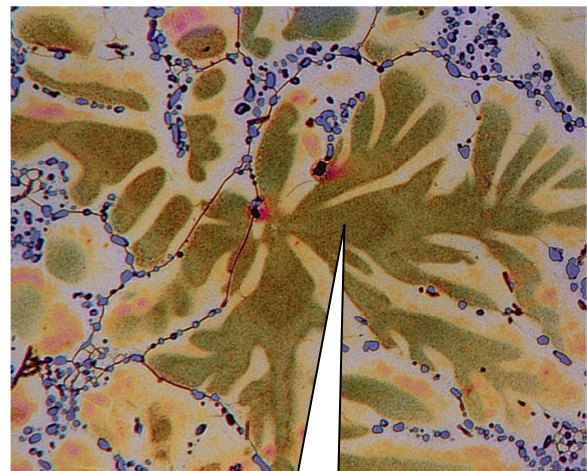


Obr. 15 Dendritická struktura oceli [5]



dendrit

Obr. 16 Litá struktura slitiny Al - Si (AlSi7Mg0,3) [7]



dendrit

Obr. 17 Dendritická struktura slitiny Al - Si [7]

4. Poruchy krystalové mřížky

V reálných podmínkách krystalizace kovů a slitin krystaly nemají pravidelný tvar a v krystalových mřížkách se vyskytují tzv. poruchy. Mřížkové poruchy se rozdělují na:

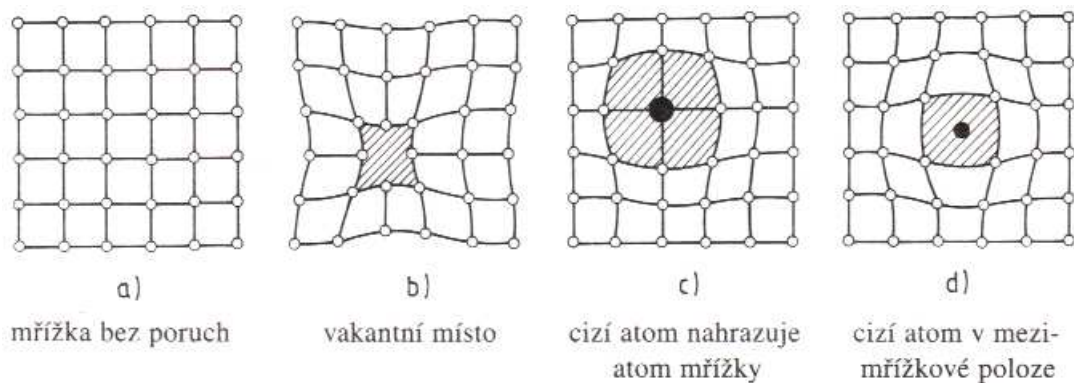
- bodové,
- plošné,
- prostorové.

Výskyt mřížkových poruch má velký význam při vzniku tuhých roztoků ve slitinách a v technologii tváření (např. válcování).

Bodové poruchy (obr. 18) nastávají následujícími způsoby

- v mřížce se vyskytuje neobsazený uzlový bod (vakance),
- v mřížce atom jiného prvku nahrazuje atom základního prvku (substituce),
- atom jiného prvku je v mezimřížkové (intersticiální poloze).

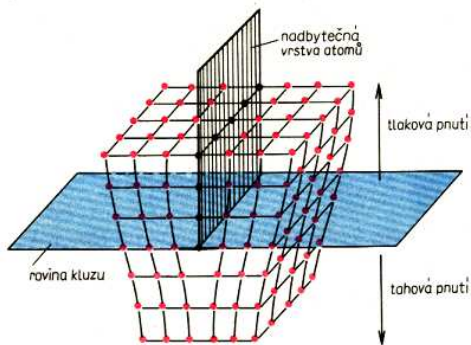
Mřížkové poruchy způsobují deformaci mřížky. Bodové poruchy se podílejí na vzniku tuhých roztoků (intersticiálních nebo substitučních) a umožňují probíhání difuze v tuhém stavu.



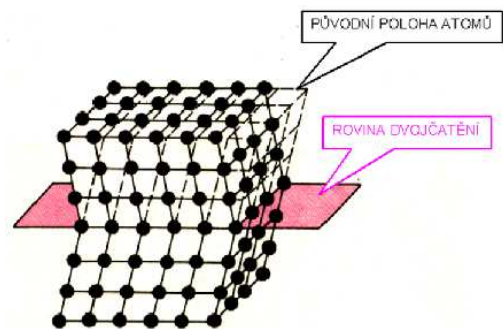
Obr. 18 Bodové poruchy krystalové mřížky [4]

Plošné poruchy nazývané dislokace vznikají, když se v krystalové mřížce vyskytuje nadbytečná rovina atomů (obr. 19). Tyto poruchy mají schopnost se přemísťovat, když na těleso z daného materiálu působí vnější mechanické síly. Vlivem těchto sil těleso trvale změní tvar vlivem posouvání dislokací v krystalu ve směru působení vnější síly. Čím víc je ve struktuře dislokací, tím je těleso plastičtější. Plošné poruchy lze pozorovat při 10 000násobném zvětšení na mikroskopu

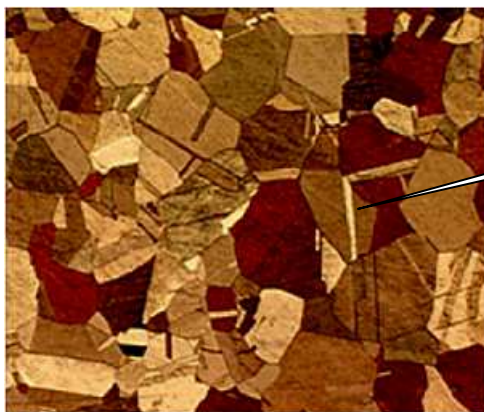
K prostorovým poruchám patří dvojčatění. Jejich význam je v praxi je podobný jako u dislokací. Dvojčatění lze pozorovat pod mikroskopem už při 100násobném zvětšení (obr. 19 a 20).



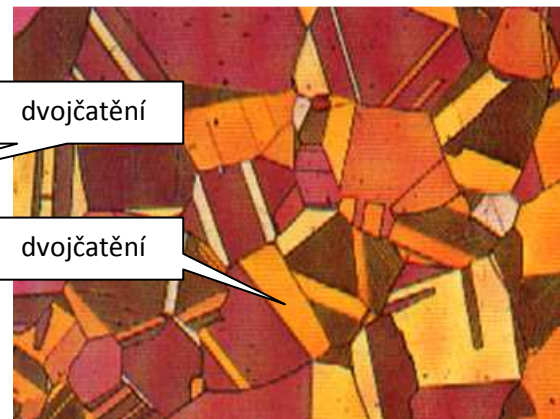
Obr. 19 Plošná porucha - dislokace [1]



Obr. 20 Prostorová porucha - dvojčatní [1]



Obr. 21 Mikrostruktura čisté mědi [7]



Obr. 22 Mikrostruktura nábojnicové mosazi (CuZn30) [7]

5. Mechanizmy difuze v tuhém stavu

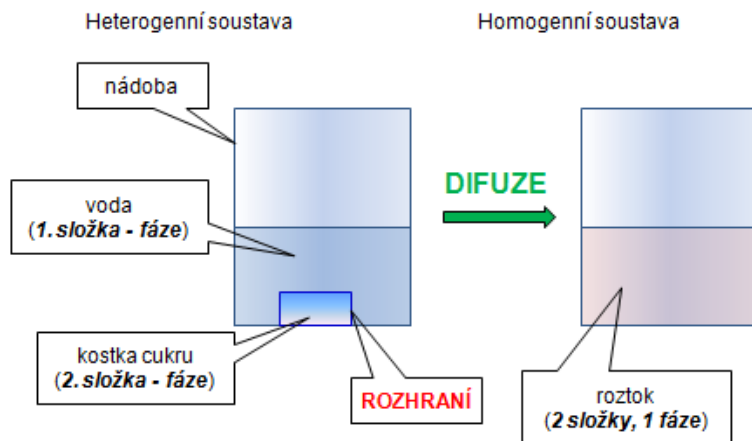
Co je difuze?

Do nádoby s vodou se vloží kostka cukru. Po určitém čase (2 až 3 dny) kostka cukru není v nádobě, rozpustila se ve vodě (obr. 23).

Difuze je samovolný transport látky v nepohyblivém prostředí látky jiné a vzniká jako důsledek

- termického pohybu molekul,
- rozdílu koncentrací transportované látky v soustavě.

Cukr i voda jsou tvořeny molekulami. Při teplotě okolí (23 °C) se tyto stavební částice kmitají. Při ponoření kostky cukru do vody je koncentrace cukru v kostce 100 % a ve vodě je 0 % cukru. Tato soustava o dvou složkách se snaží vyrovnat tento rozdíl koncentrací. Z tohoto důvodu se kostka cukru rozpouští a s vodou vytvoří roztok, tj. homogenní soustavu. Difuzi lze urychlit např. přidáním cukru do ohřáté vody.

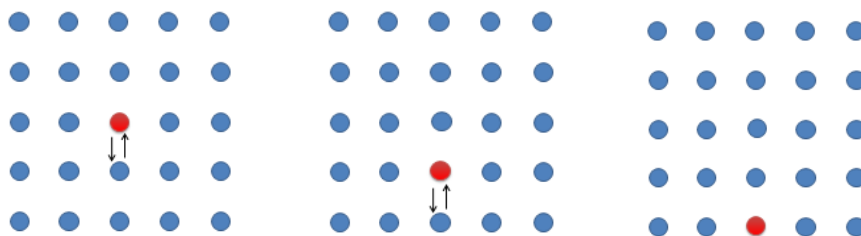


Obr. 23 Princip difuze

Ve slitinách v tuhém stavu probíhá difuze. Na mechanismus difuze u slitin jsou tři teorie:

1. výměnný mechanismus difuze,
2. intersticiální mechanismus difuze,
3. vakantní mechanismus difuze.

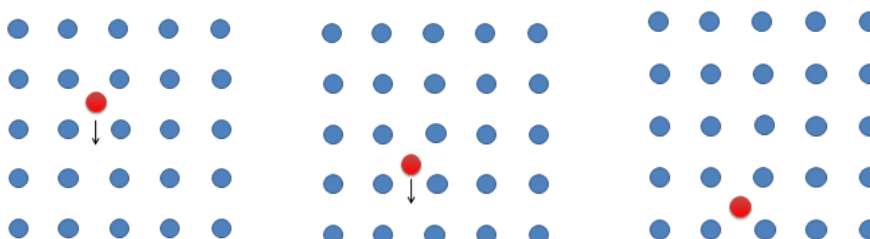
Výměnný mechanismus difuze předpokládá, že jeden nebo dva atomy různých prvků si vzájemně vymění místo v uzlových bodech krystalové mřížky (obr. 24). Tato teorie z hlediska energetické náročnosti tohoto procesu je málo pravděpodobná.



Obr. 24 Výměnný mechanismus difuze

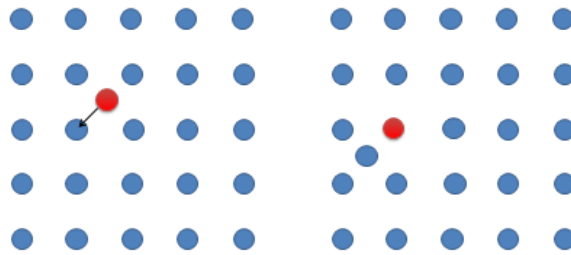
- atom základního prvku, ● atom druhého prvku (příměs)

Intersticiální mechanismus difuze předpokládá, že atomy se přemísťují pohybem atomů příměsi z jedné intersticiální polohy do polohy druhé (obr. 25) nebo vytlačení atomu základního prvku z uzlové polohy v mřížce do intersticiální polohy vlivem příměsi (obr. 26).



Obr. 25 Intersticiální mechanismus difuze

- atom základního prvku, ● atom druhého prvku (příměs)



Obr. 26 Intersticiální mechanismus difuze

● atom základního prvku, ● atom druhého prvku (příměs)

Podle teorie vakantního mechanismu difuze dochází k přemísťování atomů v tuhém stavu tak, že atomy přísadového prvku se přemísťují pomocí vakantních míst v krystalové mřížce (obr. 27).



Obr. 26 Vakantní mechanismus difuze

● atom základního prvku, ● atom druhého prvku (příměs)

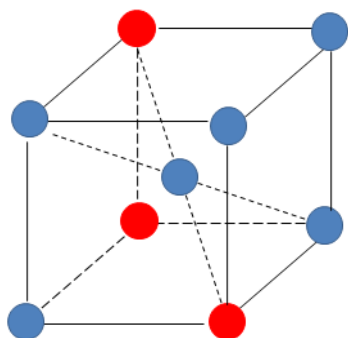
6. Tuhé roztoky ve slitinách

Slitiny jsou tvořeny dvěma nebo vícero prvky, z nichž je alespoň jeden kov. Je to soustava která vzniká tavením základního prvku, do kterého se přidávají další prvky (příměsi) pro zlepšení mechanických a technologických vlastností, např. hliník (Al) o čistotě 99,85 % má pevnost 60 až 150 MPa. Přidáním mědi (Cu) a hořčíku (Mg) se jeho pevnost zvýší na 200 až 450 MPa. Tento postup při výrobě slitin se nazývá legování.

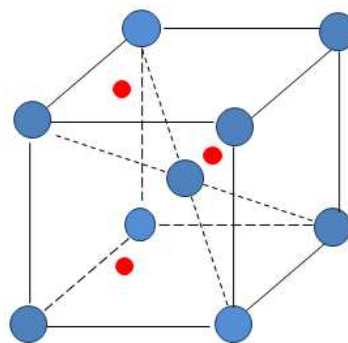
Ve slitinách mohou prvky krystalizovat samostatně nebo vytvářejí tzv. tuhé roztoky. Tuhé roztoky tvoří strukturální složky slitiny a lze je rozdělit na dva typy:

- a) intersticiální,
- b) substituční.

U intersticiálních tuhých roztoků se atomy příměsi umísťují v meziprostorách krystalové mřížky základního kovu. U substitučních tuhých roztoků atomy příměsi nahrazují atomy základního kovu v jeho krystalové mřížce (obr. 27 a 28).



Obr. 27 Schéma krystalové mřížky substitučního tuhého roztoku



Obr. 28 Schéma krystalové mřížky intersticiálního tuhého roztoku

Kdy ve struktuře slitiny bude substituční, resp. intersticiální tuhý roztok?

Podmínky vzniku určitého typu tuhého roztoku je dáno podobností krystalových mřížek prvků ve slitině a velikostí jejich atomů. Prvky, které mají podobné krystalové mřížky a poloměry atomů se neliší o více jak 15 %, vytvářejí substituční tuhý roztok (tabulka 1). Prvky, u kterých tato pravidla neplatí, vytvářejí intersticiální tuhé roztoky (tabulka 2).

Tabulka č. 1 Podmínky vzniku substitučního tuhého roztoku

Prvek	Značka	Krystalová mřížka	Poloměr atomu [pm]*)	Porovnání poloměru atomů	Závěr
Měď	Cu	Krychlová plošně centrovaná	128	3 %	měď a nikl vytvářejí substituční tuhý roztok
Nikl	Ni	Krychlová plošně centrovaná	124		

pm - pikometr (10^{-12} m)

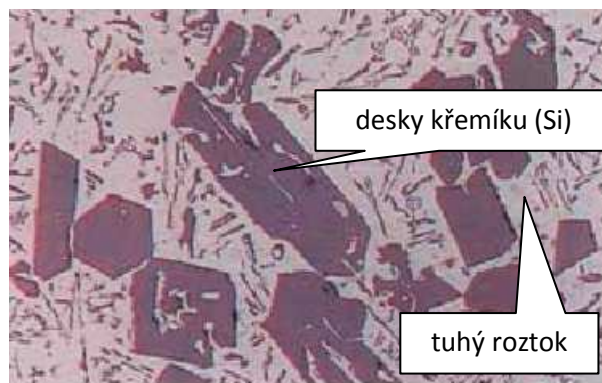
Tabulka č. 2 Podmínky vzniku intersticiálního tuhého roztoku

Prvek	Značka	Krystalová mřížka	Poloměr atomu [pm]	Porovnání poloměru atomů	Závěr
Železo	Fe	Krychlová plošně centrovaná Krychlová objemově centrovaná*)	140	200 %	železo a uhlík vytvářejí intersticiální tuhý roztok
Uhlík	C	Šesterečná (grafit)	70		

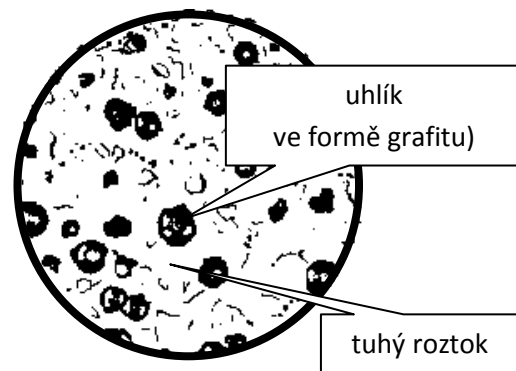
Železo do 911 °C krystalizuje v krychlové objemově středěné mřížce

Tabulka č. 3 Podmínky vzájemné nerozpustnosti složek ve slitině

Prvek	Značka	Krystalová mřížka	Poloměr atomu [pm]	Porovnání poloměru atomů	Závěr
Antimon	Sb	Trigonální	140	25 %	antimon a olovo krystalizují ve slitině samostatně z důvodu rozdílnosti krystalových mřížek
Olovo	Pb	Krychlová plošně centrovaná	175		



Obr. 29 Mikrostruktura litého stavu slitiny AlSi20 (Zv. 150x) [7]



Obr. 30 Mikrostruktura slitiny železa s uhlíkem [4]

Na obr. 29 je slitina hliníku a křemíku. Průměrný obsah křemíku je 20 %. Od koncentrace cca 13 % křemíku se vyskytují ve struktuře slitiny desky křemíku, protože hliník se v křemíku nerozpouští. Křemík se částečně rozpouští v hliníku a společně vytvoří tuhý roztok. Na obr. 30 je slitina železa a uhlíku a obsah uhlíku je větší než 2 %. Tato slitina se nazývá litina.

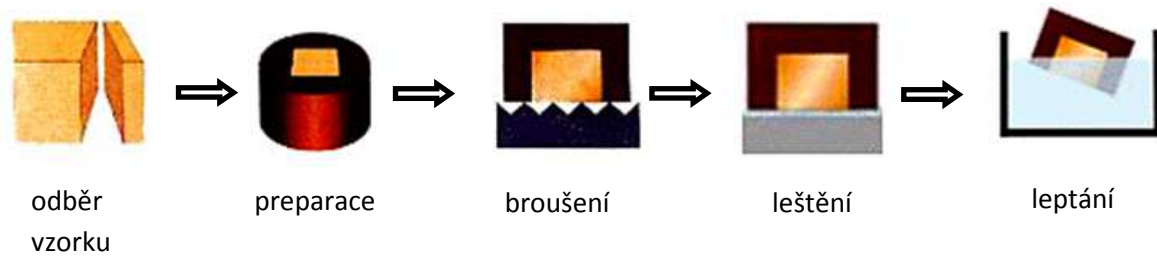
Pro pozorování struktury kovových materiálů je potřeba připravit vzorky. Vzorky je nutno připravit určitými postupy. Pozorování a vyhodnocování struktury následně probíhá pomocí metalografických mikroskopů.

7. Příprava vzorků pro pozorování struktury

Postup přípravy vzorků pro pozorování struktury se skládá z následujících etap:

- volba místa odběru,
- odběr vzorků,
- preparace vzorku,
- označení vzorku,
- broušení,
- leštění,
- leptání.

Celý postup je schematicky znázorněný na obr. 31.



Obr. 31 Etapy přípravy vzorků pro pozorování struktury kovových materiálů

Volba místa odebrání vzorku

Podstatou této etapy je získání reprezentativního vzorku, který bude odpovídat charakteru struktury zkoumané součásti. Z tohoto důvodu se odebírá ze součásti nebo materiálu více vzorků. Vzorky musejí být přesně a dostatečně označeny s ohledem na původní vzorek, aby bylo možné zpětně určit místo odběru po metalografické přípravě vzorku (obr. 32).



Obr. 32 Označení místa odběru vzorků

Odebrání vzorku

Mezi základní metody odebrání vzorků patří dělení, řezání, stříhání a abrazivní rozbrušování za mokra. Na obr. 33 je kotoučová rozbrušovací pila Mikron 110 pro odebírání metalografických vzorků. Při odebírání vzorků musí probíhat dělení optimální řeznou rychlostí bez deformací materiálu a s dostatečným chlazením místa řezu, aby struktura materiálu nebyla tepelně a mechanického ovlivněna. Na obr. 34 jsou správně a nesprávně odebrané vzorky.



Obr. 33 Kotoučová rozbrušovací pila Mikron 110



nesprávně



správně

Obr. 34 Odebraný materiál pro přípravu vzorků [9]

Preparace vzorku

Při odebrání rozměrově malého vzorku je nutné pro snadnější manipulaci v dalších etapách jej zalít do umělé hmoty, čímž se zvětší plocha metalografického výbrusu. Jednou z metod je zalévání vzorků za studena. K tomuto účelu se používá dvousložková pryskyřice, která se skládá z prášku a kapaliny (tvrdidla). Smícháním obou složek v určeném poměru vznikne tekutá zalévací hmota. Pro přípravu se používají formičky, do kterých se vloží odebraný vzorek a následně se zalije pryskyřicí. Pryskyřice ztvdne a následně po určité době (cca 24 hodin), následně lze zalitý vzorek z formičky vytáhnout.



Obr. 35 Formičky se vzorky před zalitím pryskyřicí

Broušení

Účelem broušení je odstranění pásma deformací, které vzniklo dělením materiálu, a dosažení rovinného povrchu vzorku s jeho minimálním poškozením. Pro broušení se používají leštičky vzorků, u kterých lze použít brusné papíry s různou drsností povrchu. Na obr. 36 je leštička SAPHIR 360.

Při ručním broušení první krok spočívá v „zachycení roviny“ na vzorku, ve druhém kroku (na brusném papíru o jemnější zrnitosti) se otočí vzorek o 90°. V broušení se pokračuje do té doby, než vymizí rýhy po předchozím broušení na papíru s vyšší zrnitostí.



Obr. 36 Leštička SAPHIR 360



Obr. 37 Brusné papíry

Leštění

Účelem leštění je odstranění vrcholů povrchové drsnosti na vzorku. Jednou z metod je mechanické leštění, při kterém tvrdá brousící zrna (např. Al_2O_3 , diamant) působí na povrch vzorku. Brousící zrna mohou být pevně uchycena na leštícím nástroji nebo se volně pohybovat mezi leštícím nástrojem a vzorkem. V případě druhého způsobu jsou zrna brusiva v pastě nebo emulzi. Zrnitost brusiva je 0,7 až 9 μm .

Při použití leštící pasty se tato nanese na leštící kotouč, na povrchu kterého je textilie. Kotouč se v průběhu celého procesu leštění zvlhčuje technickým lihem. Vzorkem se pohybuje proti směru otáčení kotouče. Vzorek se leští tak dlouho, dokud není dosažen kovově lesklý až zrcadlový povrch bez škrábanců a rýh.

Leptání

Leptání povrchu vzorku pomocí vhodného leptadla umožňuje pozorovat strukturu materiálu. Pro slitiny železa (oceli a litiny) se používá např. 3%ní kyselina dusičná, která se označuje názvem NITAL 3. Slitiny hliníku a křemíku (siluminy) se můžou leptat např. 10%ní kyselina fosforečná. Vlivem leptadla dojde k chemické reakci s e strukturními složkami a tím k zvýraznění struktury.

Po leptání následuje pozorování struktury pomocí metalografických mikroskopů.



ODKAZY NA LITERATURU

- [1] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., KOPEC, R., MODRÁČEK, O. *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. ISBN 04-217-76.
- [2] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Krystal>
- [3] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Halit>
- [4] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., MODRÁČEK, O. *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu*. 3. přepr. vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o., 2002. ISBN 80-7183-265-0
- [5] VYSLOUŽIL, Z., ZELKO, J. *Meranie v strojárstve*. 2. přepracované vydání. Bratislava: Alfa, 1962. ISBN 63-036,73.
- [6] <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>
- [7] MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V., KOŘENÝ, R., DRÁPAL, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A. a kol. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin s.r.o, 2005, 701 s., ISBN 80-89041-88-4
- [8] MICHNA, Š., KUŠMIERCZAK, S. *Praktická metalografie*. Ústí nad Labem: UJEP, 2012, 245 s., ISBN 978-80-7414-503-2



MÍSTO PRO DOPLNĚNÍ

1	Charakterizujte a nakreslete a) prostorově středěnou, b) plošně středěnou kubickou krystalovou mřížku.
2	Uveďte a) rozdělení, b) charakteristiku mřížkových poruch.
3.	Uveďte charakteristiku a) krystalizace, b) krystalizačních zárodků.
4.	Vysvětlete podstatu krystalizace s ohledem na parametry, které mají vliv na její průběh.
5.	Definujte pojmy a) slitina, b) difuze.

6.	Uvedte a) rozdělení, b) charakteristiku jednotlivých druhů tuhých roztoků ve slitinách.
7	Popište jednotlivé mechanismy difuze.
8	Uvedte, čím se zabývá metalografie.
9	Popište a) broušení, b) leštění vzorku pro pozorování struktury materiálu.
10	Vysvětlete účel leptání vzorku pro pozorování struktury materiálu.

