

1 VNÚTORNÁ STAVBA KOVOVÝCH MATERIÁLOV

1.1 Atómy a väzby v kovoch a zliatinách

Výsledné vlastnosti kovov a zliatin sú určené mnohými faktormi, predovšetkým druhom a vlastnosťami atómov, ktoré ich vytvárajú, ich vzájomnou väzbou, ich priestorovým rozložením a usporiadaním, ako aj prítomnými poruchami kryštalickej stavby pevnej látky.

Základnou stavebnou časticou hmoty je **atóm**, ktorý sa skladá z kladne nabitého jadra, kde je sústredená prevažná časť hmotnosti atómu a z atómového obalu, ktorý je tvorený záporne nabitými časticami s veľmi malou hustotou – elektrónmi.

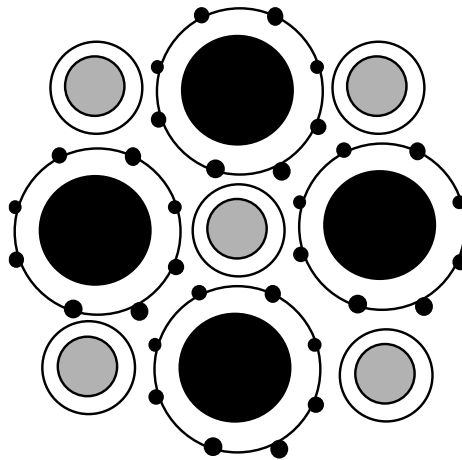
Kovové materiály sú najdôležitejšie a najpoužívanéjšie pevné látky v strojárstve, ale aj v iných odvetviach. Kov možno charakterizovať mnohými technicky užitočnými vlastnosťami ako je vysoká mechanická pevnosť, schopnosť plastického pretvorenia pri pôsobení vonkajších síl, vysoká elektrická a tepelná vodivosť, kovový lesk a pod. Tieto vlastnosti majú nielen čisté kovy, tvorené atómami jedného druhu, ale aj sústavy zložené z niekoľkých kovov, prípadne z kovov a nekovov, tzv. zliatiny kovov. Všetky kovy a ich zliatiny (s výnimkou ortuti) sú pri teplote okolia v kryštalickej stave, ktorý sa vyznačuje pravidelným priestorovým usporiadaním atómov v priestore. Prevažná väčšina technológií výroby kovov a zliatin využíva proces kryštalizácie z tavenín, ktorý je významne ovplyvňovaný okrem iného aj chemickým zložením tuhnucej taveniny. Vlastnosti kovových materiálov môžu podstatne ovplyvniť riadené fázové premeny v tuhom stave.

Kovy môžeme z hľadiska periodickej sústavy prvkov charakterizovať ako prvky s neúplne obsadenou vonkajšou sférou, t.j. ako prvky, ktoré sú schopné elektróny uvoľňovať, a teda tvoriť katióny.

Kovy je možné rozdeliť na tri skupiny: medzi **prechodové (tranzitívne) kovy T** patria prvky s nezaplnenou predposlednou sférou elektrónmi, pri čiastočnom obsadení vyššej sféry. Patria sem technicky najvýznamnejšie kovy (Fe, Mn, Cr, Ni, Co, V, Ti, Zr, Mo, W, Nb atď.). **Kovy skupiny A (alkalické kovy)** sú charakterizované veľkou chemickou afinitou pri tvorbe zlúčenín. Tvoria silné zásady, sú nestále na vlhkom vzduchu, majú nízku teplotu tavenia a nízku mechanickú pevnosť (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr). Ich atómom chýba mnoho elektrónov ku konfigurácii najbližšieho vzácneho plynu. **Kovy skupiny B** majú úplne obsadenú predposlednú sféru a majú niektoré vlastnosti nekovov. Tvoria teda prechod medzi kovmi a nekovmi (Mg, Al, Zn, Cd, Hg). Na rozdiel od skupiny A, ich atómom chýba málo elektrónov ku konfigurácii najbližšieho vzácneho plynu.

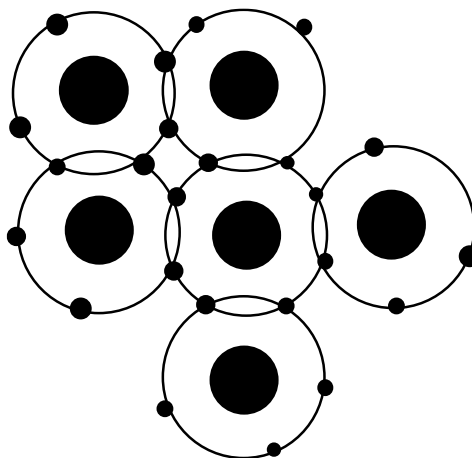
Priblížením napr. dvoch osamotených atómov do určitej vzdialenosti začnú tieto na seba pôsobiť - vzniká **väzba medzi atómami**. Medzi atómami rozličného druhu môžu vzniknúť štyri druhy väzieb:

1. **Iónová** väzba, obr.1.1, vzniká ako dôsledok elektrostatických síl medzi kationmi a aniónmi. Pri tejto najpevnejšej väzbe sa v oboch atónoch doplní sféra valenčných elektrónov.



Obr. 1.1 Princíp iónovej väzby

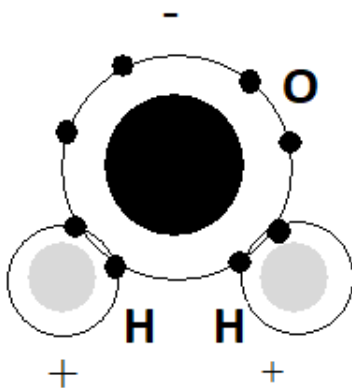
2. **Kovalentná** väzba, (obr. 1.2) vzniká vytvorením dvojice (niekoľkých dvojíc) elektrónov, ktorá patrí obom (viacerým) atómom. Usporiadanie atómov je smerované v orientácii dvojice (niekoľkých dvojíc) elektrónov.



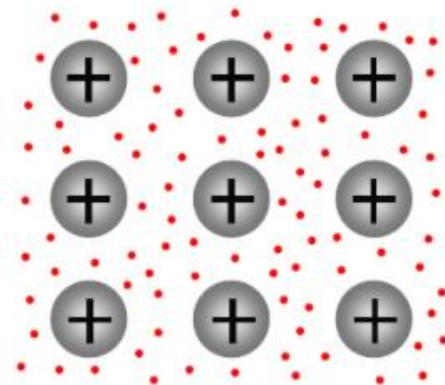
Obr. 1.2 Princíp kovalentnej väzby – atóm uhlíka – 4 valenčné elektróny

3. **Molekulová väzba** (väzba Van der Waalsovými silami) (obr. 1.3), vzniká ako dôsledok elektrických dipólov elektrónov v určitých polohách vzhľadom na jadro. Pôsobí na väčšie vzdialenosti ako je medziatómová vzdialenosť.
4. **Kovová** väzba, (obr. 1.4), vzniká, keď atómy uvoľnia časť valenčných elektrónov do spoločného vlastníctva kladných iónov. Pevnú látku si potom predstavujeme ako súbor kationtov, ktoré sú držané spolu súborom valenčných elektrónov od jednotlivých atómov (elektrónový oblak, mračno). Väzba je typická pre prvky s menším ako polovičným obsadením vonkajšej sféry elektrónmi, čo sú kovy. Elektróny pohyblivé na väčšie

vzdialenosti sú podmienkou dobrej elektrickej vodivosti kovov. Kovová väzba umožňuje plasticosť a húževnatosť kovov.



Obr. 1.3 Princíp molekulovej väzby
„molekula H₂O“



Obr. 1.4 Princíp kovovej väzby

1.2 Kryštalická stavba kovov a zliatin

Kryštalická stavba je veľmi dôležitou vlastnosťou kovov a ich zliatin. Všetky kryštalické látky v tekutom alebo pevnom stave predstavujú systém, ktorý pozostáva z jednotlivých častíc - atómov. Pri prechode od jednotlivých atómov k pevnej kryštalickej látke sa odohrávajú procesy, ktoré zapríčiňujú vzájomný účinok častíc na seba v celom systéme, čím vznikne látka s úplne novými vlastnosťami a podstatou. Spomínané novovzniknuté vlastnosti u jednotlivých častíc neexistovali. Tieto zákonitosti sú využívané pri výrobe zliatin so špecifikovanými mechanickými a fyzikálnymi vlastnosťami.

Pri prechode kovovej látky z taveniny do pevného stavu sa neusporiadaný stav atómov v tavenine dostáva do pravidelného usporiadania v tuhom stave. V prípade, že tento prechod prebehne pomaly a za regulovaných podmienok, môže nastať také vnútorné usporiadanie atómov, ktoré sa prejaví pravidelnosťou vonkajšieho tvaru a tak vznikne kryštál.

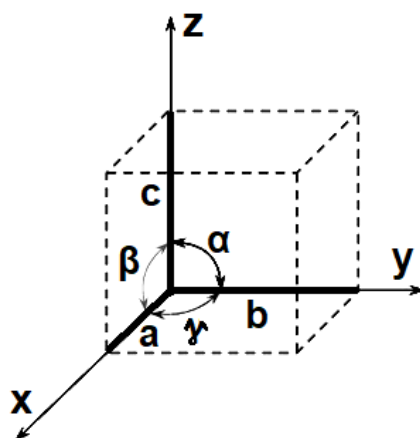
Kryštály sú typické rovinnými stenami. Medzi rovinnými stenami sa opakujú rovnaké uhly. Ak rast kryštálu prebieha v nerušenom prostredí, získava sa pravidelnosť vonkajších tvarov kryštálu u kovových látok. Tento jav sa u kovov dosahuje len ojedinele vzhľadom na ich kryštalizačnú schopnosť. Pri kryštalizácii získavame u kovov telesá s pravidelnou vnútornou stavbou, ktorá odpovedá danej kryštalografickej sústave, ktorá má nepravidelne vyvinutý vonkajší tvar.

Kovy a ich zliatiny sa ako kryštalické látky označujú vtedy, ak pôsobia ako pevné látky s tesným uložením a pravidelným usporiadaním základných častíc. Kryštalické látky sú zložené z geometrických útvarov, určených rozmermi a tvarom. Pri tvorbe tuhej látky sa atómy v

priestore ukladajú tak, aby ich energia bola čo najmenšia. Tomuto rozloženiu odpovedá presný poriadok v priestorovom rozložení častíc.

1.2.1 Druhy kryštalografických mriežok

Kovy a ich zliatiny sú kryštalické látky (pevné látky s tesným uložením a pravidelným usporiadaním základných stavebných častíc - atómov, iónov), ktoré sa skladajú zo základných geometrických útvarov, určených svojimi rozmermi, tvarom a tiež spôsobom priestorového obsadenia objemu týchto útvarov časticami. Geometrické útvary vytvárajú **priestorovú mriežku**, ktorá obsahuje súbor **uzlových bodov**. Najmenšia časť priestorovej mriežky, ktorá obsahuje najmenší možný počet uzlových bodov, sa nazýva **elementárna bunka**, (obr. 1.5).



Obr. 1.5 Znáozornenie priestorovej mriežky s uzlovými bodmi a elementárnej bunky, určenej parametrami a, b, c a uhlami α, β, γ

Všetky elementárne bunky, ktoré tvoria priestorovú mriežku sú úplne rovnaké geometrické útvary a každý uzlový bod má úplne identické okolie. Dĺžky hrán elementárnej bunky na jednotlivých osách x, y, z sú tzv. **mriežkové parametre a, b, c** . Veľkosť parametrov je radu 10^{-10} m.

Podľa veľkosti uhlov α, β, γ medzi osami x, y, z a veľkosti mriežkových parametrov a, b, c rozoznávame 7 kryštalografických sústav, pomocou ktorých opisujeme 14 geometricky možných priestorových mriežok (tab. 1.1).

Keď geometrické útvary (elementárne bunky) v uzlových bodoch obsadia atómy (ióny) získame **štruktúrnu mriežku**. Priestorovej mriežke potom zodpovedá **kryštálová štruktúra** (štruktúrna kryštalografia). Uzlové body nemusia však byť obsadené len jediným druhom atómov alebo iónov (čistý kov), ale aj komplexom častíc (zliatiny, zlúčeniny), ktoré sú medzi sebou viazané určitým typom väzby. Takýto komplex častíc sa nazýva **motív** alebo **báza** štruktúry. To umožňuje vznik nesmierného množstva kryštálových štruktúr, či už pozorovaných v prírode alebo vyrobených umele.

Štruktúrna mriežka je teda charakterizovaná tvarom, rozmermi (parametre), rozmiestnením častíc a motívom. Vznik kryštálovej štruktúry, a teda i štruktúrnej mriežky, si môžeme predstaviť ako priestorové usporiadanie rovnakých gúľ (prípadne motívov). Podľa spôsobu ukladania vrstiev a podľa stiesnenosti gúľ v jednej vrstve sa získajú rôzne štruktúrne mriežky. Rozmer gúľ súvisí s rozmerom atómov (iónov), z ktorých uvažovaná látka pozostáva.

Tabuľka 1.1 Charakteristiky možných priestorových mriežok

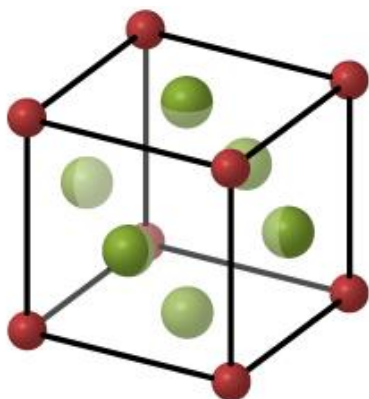
sústava	základné údaje sústavy	priestorová mriežka
triklinická	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	jednoduchá
monoklinická	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	jednoduchá
		bazálne centrovaná
ortorombická	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	jednoduchá
		bazálne centrovaná
		priestorovo centrovaná
		plošne centrovaná
hexagonálna	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	bazálne centrovaná
romboedrická	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	jednoduchá
tetragonálna	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	jednoduchá
		priestorovo centrovaná
kubická	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	jednoduchá
		priestorovo centrovaná
		plošne centrovaná

Typické kovové štruktúry

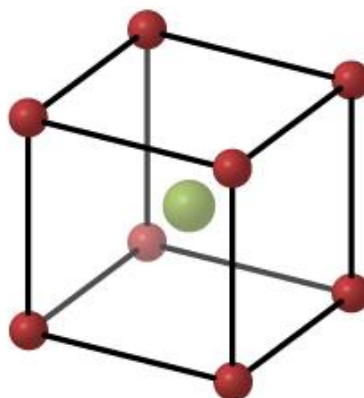
K technicky najvýznamnejším typom kryštálových mriežok radíme nasledovné typy kovových mriežok: kubická – priestorovo alebo plošne centrovaná, hexagonálna mriežka s najtesnejším usporiadaním a tetragonálna mriežka.

Kubická plošne centrovaná mriežka na obr. 1.6 má atómy vo vrcholoch kocky a v priesečníku stenových uhlopriečok. Rohové atómy patria každý jeden ôsmim mriežkam ($8 \cdot 1/8 = 1$), stenové atómy patria vždy dvom mriežkam: $6 \cdot 1/2 = 3$), a teda jednej mriežke patria 4 atómy. Koordinačné číslo (t.j. počet najbližších atómov, ktoré obklopujú každý uzlový bod mriežky, sú od neho rovnako vzdialené a pravidelne rozmiestnené) je 12.

Kubickú plošne centrovanú mriežku majú kovy Ca , Sn , Ce , Al , Fe_γ , Co , Rh , Zr , Pd , Ni , Pt , Cu , Ag , Au , Pb . Tieto kovy sú vo všeobecnosti dobre tvárniteľné za tepla i za studena



Obr. 1.6 Schéma kubickej plošne
centrovanej mriežky

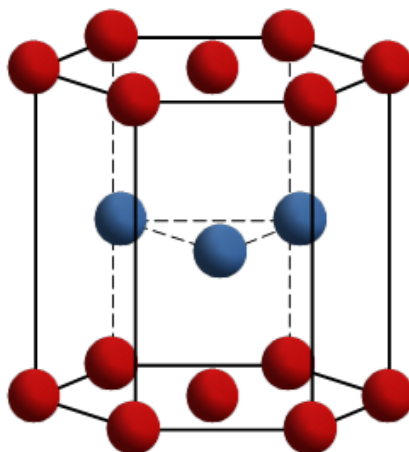


Obr. 1.7 Schéma kubickej priestorovo
centrovanej mriežky

Kubická priestorovo centrovaná mriežka na obr. 1.7, má 8 atómov v rohoch kocky, ktoré patria ôsmim mriežkam ($8 \cdot 1/8 = 1$) a atóm v priesečníku telesových uhlopriečok, ktorý patrí tejto mriežke. Jednej štruktúrnej mriežke patria teda 2 atómy. Koordináčné číslo je 8, lebo mriežka nie je vytvorená najtesnejším usporiadaním rovnakých gúľ.

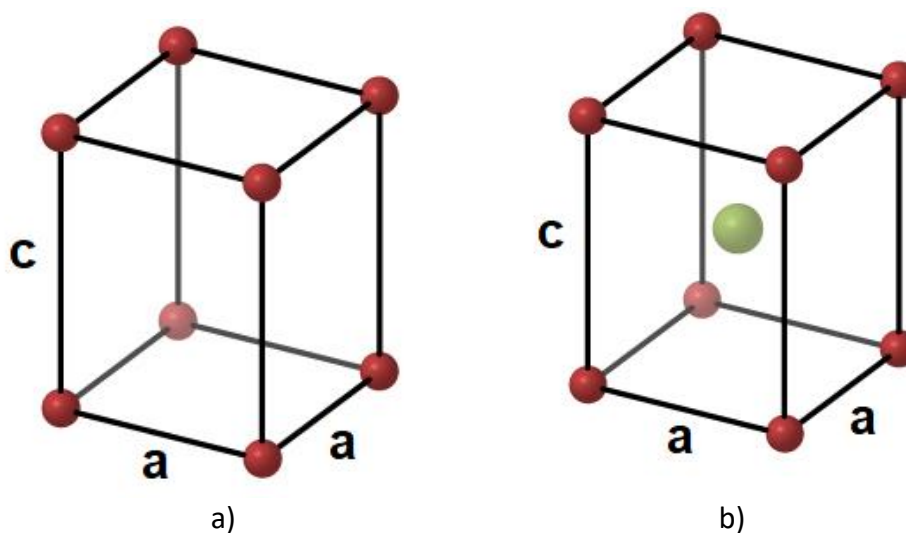
Kubickú priestorovo centrovanú mriežku majú napr.: Fe_α, Cr, Mo, W, Nb, V, Fe_δ a ďalšie prvky. Spoločným znakom tejto skupiny kovov je nízka tvárnosť za studena.

Hexagonálna tesne usporiadaná mriežka na obr. 1.8, je tvorené šesťbokým hranolom. Mriežka má 12 atómov v rohoch hranola, z ktorých patrí každý 6-tim mriežkam, 2 atómy v základniach hranola, pričom každý patrí 2 mriežkam a ešte 3 atómy, umiestnené v priehlbínach základnej vrstvy atómov v polovici výšky hranola c, ktoré patria len tejto mriežke. Jednej mriežke teda patria $12 \cdot 1/6 + 2 \cdot 1/2 + 3 = 6$ atómov. Teoretický pomer parametrov $c : a = 1,633$. Koordináčné číslo je rovnaké ako pre kubickú plošne centrovanú mriežku. Je to teda zasa najtesnejšie usporiadanie gúľ, líši sa však ukladáním gúľ na seba. V tejto sústave kryštalizuje napr.: Cd, Co_α, Mg, Ti, Zn, Zr atď. Vyznačujú sa nízkou tvárnosťou za studena aj za tepla.



Obr. 1.8 Schéma hexagonálnej tesne usporiadanej mriežky

Tetragonálna mriežka patrí do pravouhlej sústavy s parametrami a , a , c . Je charakterizovaná nerovnosťou $c > a$, pričom pomer $c : a$ sa označuje ako stupeň tetragonality. Podľa rozloženia atómov v mriežke môžu byť tetragonálne mriežky jednoduché (obr. 1.9a) alebo priestorovo centrované (obr. 1.9b). V tejto sústave kryštalizuje napr.: In, Mn, Sn, B.



Obr. 1.9 Schéma tetragonálnej mriežky a) jednoduché
b) priestorovo centrovanej

1.2.2 Poruchy stavby kryštálov

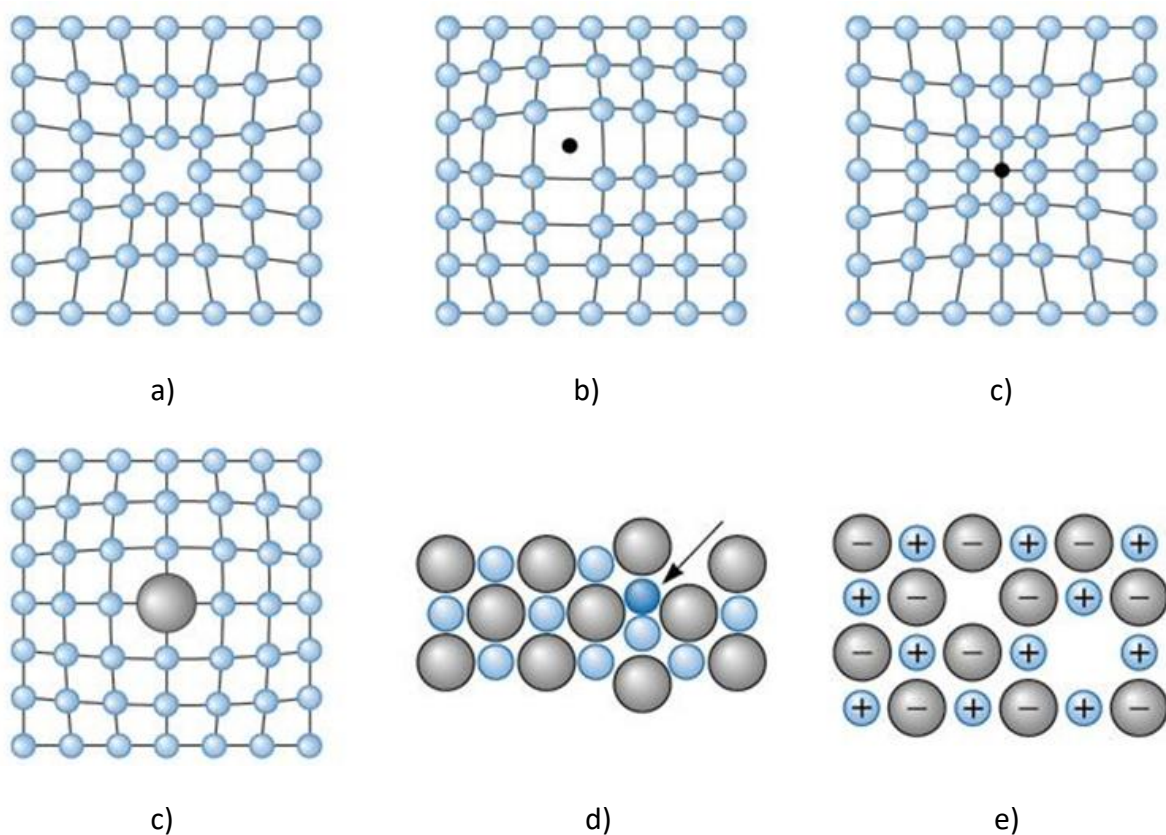
Dokonalú, geometricky presne vybudovanú kryštalovú štruktúru má iba ideálny kryštál, avšak skutočný - reálny kryštál má veľké množstvo rozličných nedokonalostí stavby, ktoré nazývame **mriežkové poruchy**. Tieto poruchy majú zásadný význam pri hodnotení a vysvetľovaní vlastností látok pri procesoch a premenách, ktoré prebiehajú v kryštalickej látke pri pôsobení rozličných vonkajších a vnútorných účinkov.

Okrem chemických porúch (chemická heterogenita) a elektrických porúch (narušovanie periodicity elektrického potenciálu) rozoznávame aj **mriežkové poruchy** (narušenie pravidelnosti usporiadania štruktúry). Medzi mriežkové poruchy patria bodové, čiarové, plošné a priestorové poruchy.

a) Bodové poruchy obmedzujú svoju pôsobnosť na malý, submikroskopický priestor. Môžu byť v termodynamickej rovnováhe v tuhej látke. Patria sem **vakancie** (prázdne miesta), čo sú vlastne neobsadené uzlové body mriežky (obr. 1.10a); **interstície** (obr. 1.10b), čo sú vlastne atómy v interstitických polohách (dutinách, medzerách) mriežky, **substitučné atómy** sú cudzie atómy v mriežke (obr. 1.10c a obr. 1.10d), **Frenkelové páry (Frenkelove poruchy)** sú to vlastne vakancie a intersticiálneho atómu. Tieto typy poruchy vznikajú, napr. vplyvom žiarenia s vysokou energiou, ktorá vypudí atóm zo svojho uzlového bodu v mriežke na miesto medzi uhlovými bodmi mriežky (napr. pri jadrovom štiepení). (obr. 1.10e) a **Schottkyho**

poruchy na obr. 1.10f sa vyskytujú v iónových kryštáloch jedná sa o tzv. kationovú vakanciu, ktorá je vyvážená aniónovou vakanciou a obe poruchy tvoria spoločný pár. V okolí Schottkyho poruchy bude dochádzať k lokálnym vysunutiam atómov z mriežky, čo môže byť interpretované aj ako lokálna deformácia mriežky a znázorňuje sa pomocou deformačných sietí mriežkových čiar.

Hlavným zdrojom bodových porúch je ožiarenie kovu, napr. neutrónmi, ohrev vzorky na vysokú teplotu a plastická deformácia. Vakancie a interstície sú termodynamicky stabilné v kryštálovej mriežke, ich množstvo so vzrastom teploty vzrastá a naopak, bodové poruchy sa môžu pohybovať mriežkou (migrovať) bez privedenia vonkajšej energie. Existencia a migrácia týchto porúch má veľký technický význam, napr. pri difúzii, vzniku zárodkov pri fázových premenách v tuhom stave, pri kumulácii poškodenia pri únave a pod.

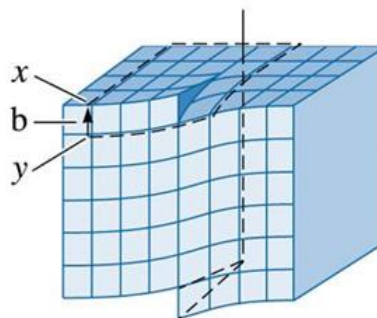
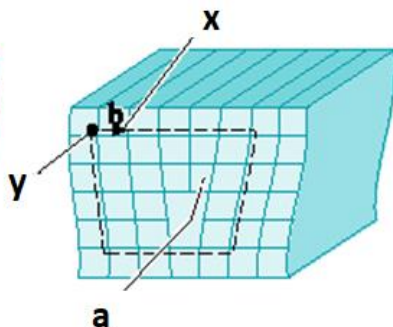
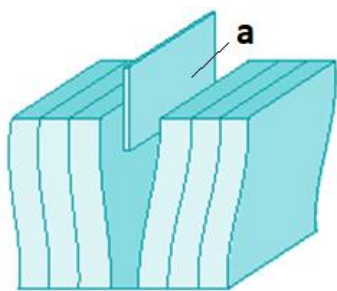


Obr. 1.10 Bodové poruchy a) vakancia b) intersticiálny atóm c) malý substitučný atóm, d) veľký substitučný atóm, e) Frenkelova porucha f) Schottkyho porucha

b) Čiarové poruchy - dislokácie sú najvýznamnejšie štruktúrne poruchy mriežky, ktorých existencia, vznik a pohyb umožňuje vysvetliť mnoho javov a pochodov v pevných látkach. V tuhej látke sú termodynamicky nestabilné.

Ak vložíme do kryštalickej štruktúry polrovinu P (obr. 1.11), potom nad rovinou R bude počet atómových rovín väčší ako pod ňou, a teda nad rovinou budú tlakové napätia a

pod ňou zasa ťahové napätia. Vložením poloroviny do mriežky vznikla pozitívna **hranová dislokácia**.



Obr. 1.11 Znáznornenie hranovej dislokácie

a – hrana vložená do mriežky, b – Burgersov vekt.
x, y – poloha vektora v rovinách

Obr. 1.12 Schéma skrutkovej

dislokácie, b – Burgersov vektor
x, y – poloha vektora v rovinách

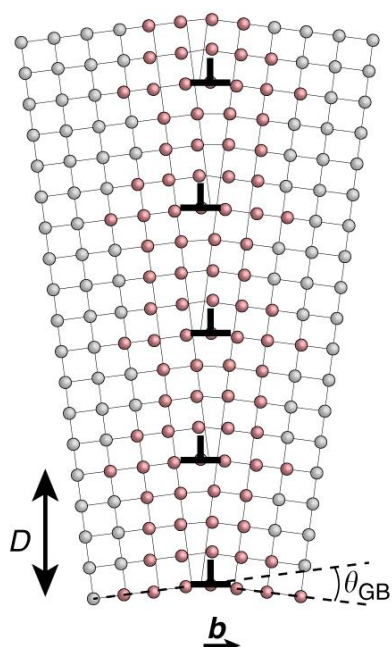
Ďalším druhom čiarovej poruchy je **skrutková dislokácia**. Jej vznik si môžeme predstaviť podľa obr. 1.12. Kryštál narežeme v rovine Q a jednu narezanú časť proti druhej presunieme o určitú hodnotu. Kryštál si potom predstavujeme akoby pozostával z jedinej atómovej roviny tvaru skrutkovice. Vznik a množstvo dislokácií závisí od spôsobu výroby a spracovania materiálu (plastickou deformáciou). Hustota dislokácií udáva celkovú dĺžku dislokačných čiar v jednotke objemu kovu. Dislokácia vo svojom okolí vyvoláva mechanické napätie s ďalekým dosahom a významne zvyšuje vnútornú energiu materiálu. **Burgersov vektor** definuje smer a veľkosť dislokácie, ktorá vznikla deformáciou mriežky. Možno ho vyjadriť ako rozdiel dĺžky slučky opísanej okolo dislokácie a slučky v neporušenej mriežke tzv. **Burgersova slučka**. Pre hranovú dislokáciu je Burgersov vektor kolmý na dislokačnú čiaru; pre skrutkovú dislokáciu je s dislokačnou čiarou rovnobežný. (viď obrázok); pri zmiešanej dislokácii zvierá Burgersov vektor s dislokačnou čiarou uhol 0° až 90° . Tretím typom čiarovej poruchy je **zmiešaná dislokácia**, ktorá je kombináciou predošlých dvoch typov dislokácií. Niektoré jej časti majú hranový charakter a iné skrutkový. Dislokačné čiary sa nemôžu končiť vo vnútri dokonalého kryštálu, ale na jeho povrchu alebo pri iných defektoch vo vnútri, alebo tiež môžu vytvárať uzavreté okruhy.

c) Plošné poruchy majú väčšie priestorové pôsobenie ako dislokácie, patria sem:

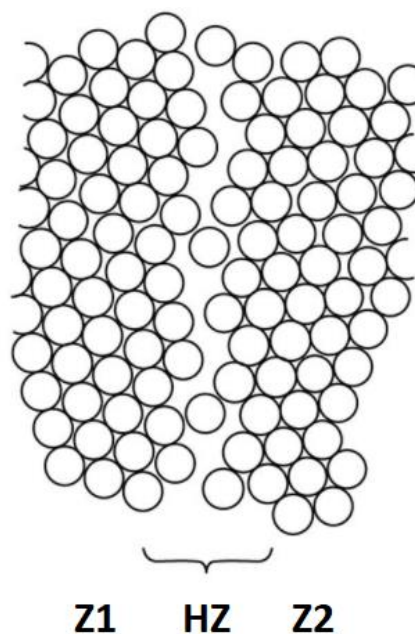
- **hranice subzrín** sú oblasti, ktoré oddeľujú jednotlivé dokonalé bloky kryštálu s rozmermi asi 10^{-6} m od seba v reálnom kryštáli, pričom dezorientácia blokov je malá - niekoľko oblúkových minút až stupňov. Hranice subzrín si predstavujeme ako dislokačné steny, t.j. dislokácie usporiadané nad sebou (obr. 1.13).

- **hranice zrn** (obr. 1.14) oddeľujú jednotlivé zrná polykryštalickej látky, pričom dezorientácia medzi zrnami je veľká. Sú to oblasti nie veľkej hrúbky (napr. pre hliník asi $4 \cdot 10^{-10}$ m), kde je výrazne porušená pravidelnosť kryštalickej stavby v dôsledku prítomnosti vysokej hustoty dislokácií i vysokej koncentrácie vakancií. Hranice zrn významne vplývajú na fyzikálne,

mechanické i chemické vlastnosti materiálu. Chemické reakcie prebiehajú v týchto oblastiach rýchlejšie (oxidácia, korózia). Na hraniciach zŕn intenzívnejšie prebieha difúzia, je tu vyššia koncentrácia nečistôt a prvkov ktoré pozitívne vplyvajú na vznik zárodkov pri fázových premenách.



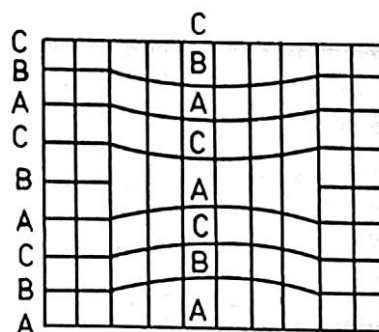
Obr. 1.13 Dislokačný model hranice subzŕn, b - burgersov vektor, θ_{GB} – uhol dezorientácie mriežky, D – vzdialenosť dislokácii



Obr. 1.14 Schéma usporiadania atómov v zŕnách (Z1, Z2) a v mieste hranice zŕn (HZ)

Chyby vrstvenia sú poruchy vo vrstvení atómových rovín na seba. Ak má kryštál uložené vrstvy (vytvorené guľovými útvarmi) v poradí ABCABCABC (obr. 1.15) a v určitej oblasti chýba časť roviny B v štruktúre, v tomto mieste je iné usporiadanie rovín.

Vznik chýb vrstvenia si môžeme predstaviť zhromaždením vakancií do daného miesta (odoberanie roviny), zhromaždením interstícií do daného miesta (pridanie roviny) a sklzom, napr. časti roviny B vzhľadom na ostatnú mriežku. Objavenie týchto porúch umožnilo vysvetliť mnoho experimentálnych pozorovaní, napr. pri tečení materiálu.



Obr. 1.15 Schéma zvláštneho prípadu chyby vrstvenia

d) Priestorové poruchy sú trojrozmerné (objemové) útvary, ktoré sa výrazne líšia či už zložením alebo usporiadaním atómov od základnej stavby kryštálu a výrazne narušujú periodicitu kryštalickej mriežky. Medzi priestorové poruchy patria napr. precipitáty, zhluky cudzích atómov, dutiny, zhluky nečistôt, nekovové súčiastky v kovovej hmote a pod.

1.2.3 Štruktúra čistých kovov a zliatin

Kryštalickú stavbu čistých kovov charakterizuje veľký počet (10^{28} až 10^{29} v 1 m^3) pravidelne priestorovo usporiadaných štruktúrnych mriežok, ktoré vytvárajú atómy jedného druhu. Rozmer „dokonale“ usporiadaných oblastí je rozličný. Pre monokryštály je tento rozmer radu až 10^{-2} m. Pre polykryštalické látky majú jednotlivé „dokonale“ usporiadané oblasti tvar priestorových mnohostenov, ktoré nazývame **zrná** (polyedrická štruktúra), s rozmermi radu 10^{-4} m. Jednotlivé zrná s rozdielnou kryštalografickou orientáciou sa stýkajú navzájom v plochách, ktoré nazývame **hranice zrn**.

Čisté kovy sa v technickej praxi používajú len zriedkavo. Prevažne sa uplatňujú zliatiny kovov, ktoré majú obyčajne vyššie technicky využiteľné vlastnosti.

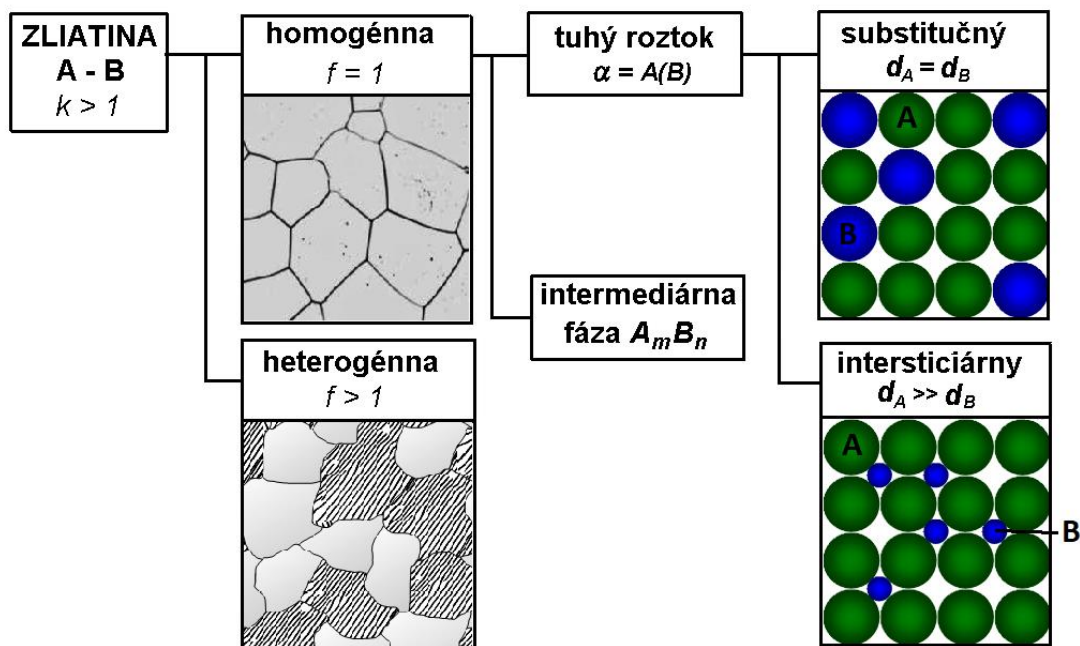
Určité vymedzené množstvo alebo objem daného kovu alebo zliatiny sa nazýva **sústava** (systém).

Zložky (komponenty) sú základné chemické časti sústavy, z ktorých v daných podmienkach môžu vznikať jednotlivé fázy zliatiny.

Chemicky a fyzikálne homogénna časť zliatiny ohraničená rozhraním, na ktorom sa jej vlastnosti menia skokom, sa nazýva **fáza**. Táto môže byť tvorená jednou, dvoma alebo viac zložkami.

Pridávanie ďalšieho kovu alebo nekovu do pôvodného (základného) kovu má za následok výrazné zmeny vlastností týchto látok.

Zliatina je kovový materiál, skladajúci sa z dvoch alebo viacerých zložiek, v ktorej prevažujúcou zložkou je kov. Podľa štruktúry môžu byť zliatiny **homogénne** (jednofázové) alebo **heterogénne** (viacfázové) sústavy - obr. 1.16. Jednofázové zliatiny majú štruktúru tuhého roztoku alebo intermediárnej fázy. Viacfázové zliatiny z hľadiska ich štruktúry nazývame **mechanické zmesi** a sú tvorené zmesou kryštálov čistých kovov, tuhých roztokov alebo intermediárnych fáz.



Obr. 1.16 Druhy vnútornej stavby zliatin

Tuhý roztok je druh kryštalickej stavby zliatiny, ktorý má mriežku jednej zo zložiek a v nej sú umiestnené častice druhej zložky (resp. ďalších zložiek). Medzi časticami prevažuje kovová väzba. Označujú sa malými písmenami gréckej abecedy. Podľa umiestnenia častíc rozpúšťajúceho sa kovu (B) v mriežke základného kovu (A) rozoznávame dva základné typy tuhých roztokov, obr. 1.16:

- **substitučný**, v ktorom sú častice rozpúšťajúcej sa zložky v uzlových polohách mriežky základnej zložky,
- **intersticiárny**, v ktorom sa častice rozpúšťajúcej zložky nachádzajú v medziuzlových polohách mriežky základnej zložky.

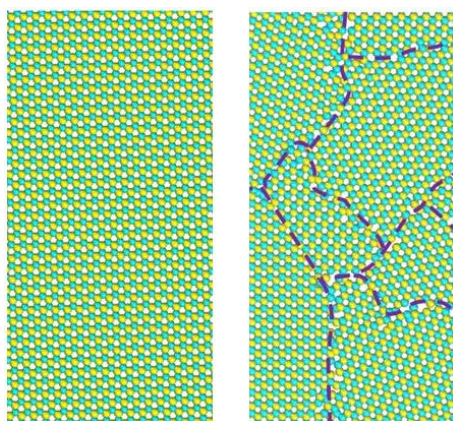
Priaznivé podmienky na vznik substitučného tuhého roztoku sú vtedy, ak zložky spĺňajú nasledovné podmienky:

- kryštalizujú v rovnakej kryštálovej mriežke,
- ich atómové priemery sú málo odlišné (max. 15 %),
- medzi obidvoma zložkami je určitá chemická afinita, nie však natoľko veľká, aby vznikla intermetalická zlúčenina.

Ak sú splnené všetky podmienky, vzniká substitučný tuhý roztok pri akomkoľvek obsahu rozpúšťanej zložky - **neohraničený tuhý roztok**. Ak niektorá z týchto podmienok je splnená len čiastočne, substitučný tuhý roztok vzniká iba do určitej koncentrácie - **ohraničený tuhý roztok**. Interstiticky sa rozpúšťajú prvky s výrazne menším atómovým

priemerom ako má základná zložka. V oboch prípadoch tuhých roztokov je rozmiestnenie atómov prídavného prvku v kryštálovej bunke náhodné. Takéto tuhé roztoky sú zároveň aj dobre tvárne. V špecifických prípadoch má tuhý roztok pravidelné usporiadanie častíc rozpúšťaného prvku a nazýva sa **usporiadaný tuhý roztok** (nadštruktúra, hyperštruktúra). Názov nadštruktúra vychádza z toho, že častice prídavného kovu tvoria vo vnútri tuhého roztoku zdanlivo vlastnú mriežku.

Intermediárne fázy, na rozdiel od tuhých roztokov, majú vlastný typ kryštalickej stavby (odlišný od zložiek). Medzi atómami sa zvyčajne uplatňuje vo veľkej miere kovalentná väzba. Z dôvodu odlišného druhu mediatómových väzieb a odlišného typu mriežky sa od zložiek, z ktorých vznikli, značne odlišujú mechanickými a fyzikálnymi vlastnosťami. Vznikajú pri určitom vzájomnom pomere (koncentracii) zložiek. Väčšinou ide o veľmi tvrdé a krehké fázy. Intermediárne fázy vznikajú pri určitom pomere zložiek, ktorý je možné vyjadriť stechiometrickým vzorcom (vo všeobecnosti A_mB_n).



Obr. 1.17 Rozdiel v orientácii priestorových mriežok
a) monokryštál b) polykryštallická látka s polyedrickou štruktúrou

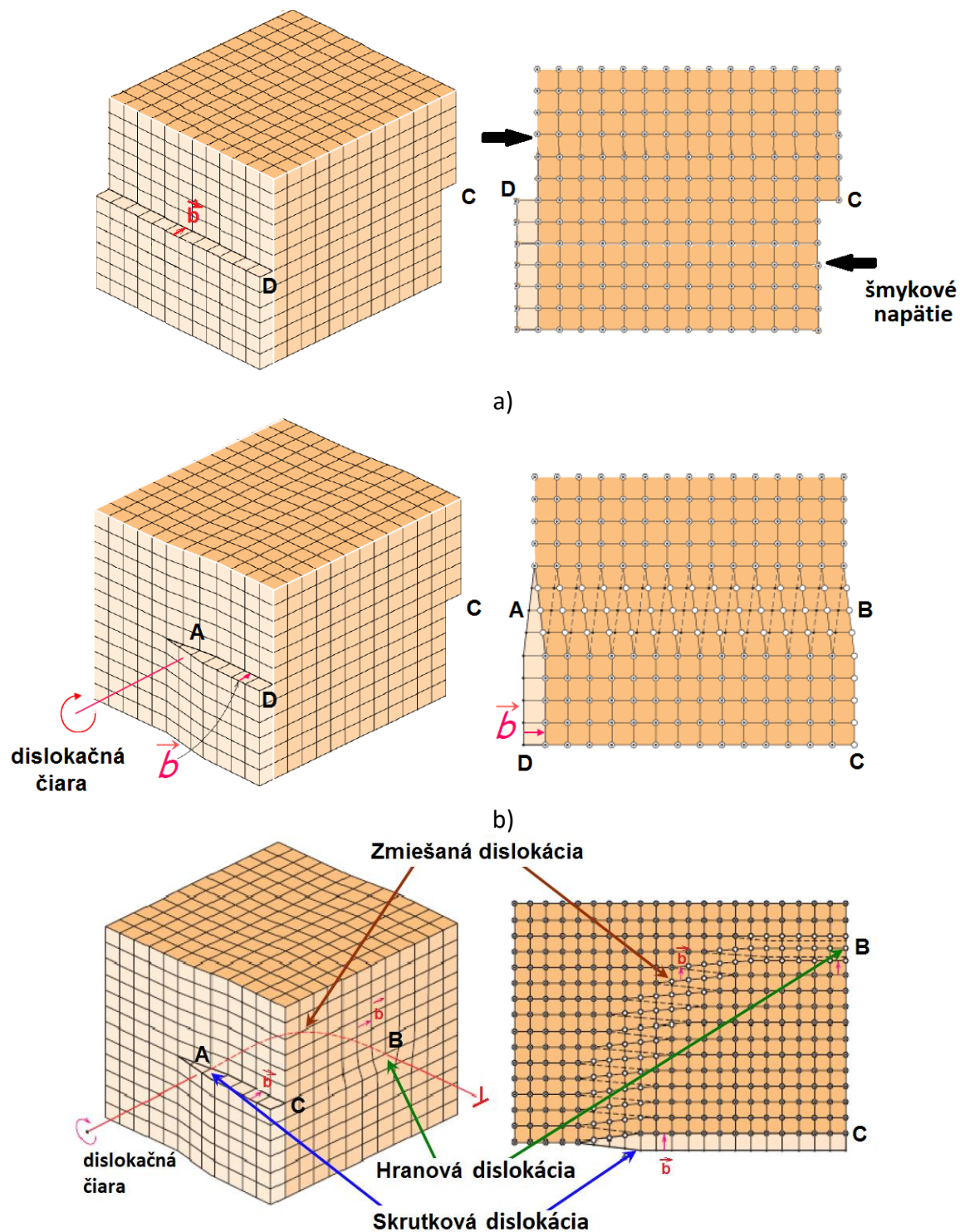
Existuje viacero druhov intermediárnych fáz, z ktorých najdôležitejšie sú chemické, interstitické a elektrónové zlúčeniny. Čisté kovy alebo zliatiny môžu mať istý makroobjem, vytvorený len jediným kryštálom (rovnaké ukladanie rovnako orientovaných štruktúrnych mriežok) - hovoríme, že máme monokryštál, obr. 1.17a. Monokryštály vznikajú pri ideálnych podmienkach ochladzovania (veľmi malou rýchlosťou). Keď však makroobjem kovu alebo zliatiny je vytvorený väčším množstvom drobných kryštálov (zrná) s rozličnou kryštalografickou orientáciou, hovoríme, že máme polykryštallickú látku (obr. 1.17b), ktorú charakterizuje dôležitá veličina, tzv. rozmer zrna. Reálne kovy a zliatiny sú polykryštallické. Zrná vznikajú v procese kryštalizácie kovov, pri reálnych podmienkach ochladzovania.

1.2.4 Vznik a pohyb dislokácií

Reálne technické kovy sa používajú väčšinou ako zliatiny s inými kovmi aj nekovmi ako zmesi, chemické zlúčeniny a tuhé roztoky. Mriežkové poruchy vznikajú metalurgiou prípravy a technológiou spracovania kovov a zliatin.

V okolí každej dislokácie je mechanická napätosť. Voľné dislokácie v ideálnych kryštáloch sú ľahko pohyblivé, nakoľko stačí prekonať už prítomnú deformačnú elastickú energiu a pridať iba energiu na pohyb kryštálom. To znamená, že na pohyb dislokácie je potrebná elementárna sila - napätie na odpútanie sa dislokácie z elastického poľa a na vlastný pohyb. Všetko čo prekáža pohybu dislokácii zvyšuje napätie na pohyb. Voľné dislokácie sa v kryštáli pohybujú:

1) sklzom - pohyb dislokácie sklzom v kryštáli sa uskutočňuje v dislokačnej (sklzovej) rovine v smere Burgersovho vektora pri hranových a prevažne kolmo naň pri skrutkovej dislokácii obr. 1.18. Burgersov vektor $\vec{b}$ je uzatvárací vektor Burgersovej slučky, ktorý spája bod S, odkiaľ sme začali ukladať určitý počet vektorov okolo čiarovej poruchy a koncový bod F posledného vektora, obr. 1.19. Pohyb dislokácií (rozhraní) je základom plastickej deformácie kovov.

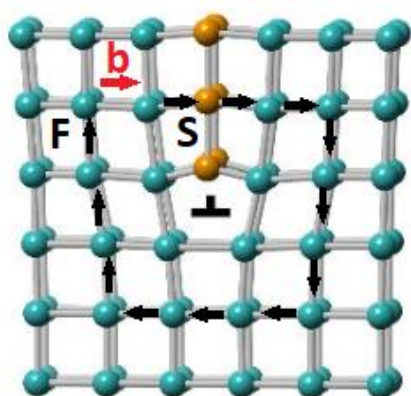


Obr. 1.18 Sklz vyvolaný pohybom
a) hranovej dislokácie b) skrutkovej dislokácie c) zmiešaná

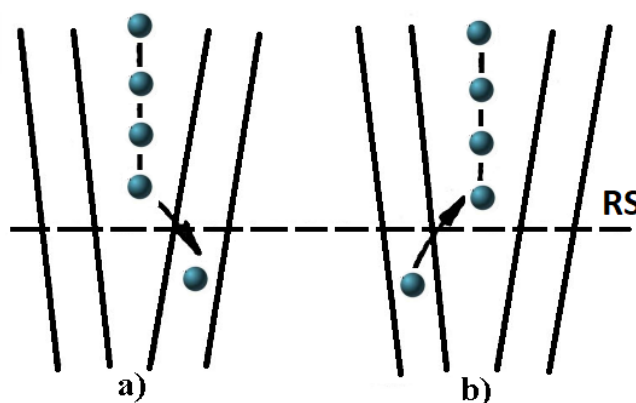
Pri pohybe dislokácie sklzom sa šíri kryštálom rovnaká konfigurácia, pričom porucha vystúpi na povrch kryštálu a zanechá tam stopu (b) - posun atómov o parameter mriežky, alebo jeho násobok.

2) difúziou - pohyb dislokácie difúziou v kryštáli sa uskutočňuje difúziou vakancií alebo medziuzlových atómov (interstícií).

Pohyb hranovej dislokácie difúziou je vlastne „lezenie“ nadbytočnej roviny v odpútaním (úbytok roviny) alebo pridávaním (rast roviny) vakancií, obr.1.20. Pohyb skrutkovej dislokácie difúziou je nemožný lebo táto sa môže pohybovať iba sklzom.



Obr. 1.19 Burgersova slučka okolo čiarovej poruchy, Burgersov vektor



Obr. 1.20 Difúzny pohyb hranovej dislokácie – šplh,
RS – rovina sklzu
a) intersticiálny atóm vzniká
b) intersticiálny atóm zaniká

1.2.5 Difúzia v kovoch a zliatinách

Častice (atómy, ióny) sa môžu za určitých podmienok, hlavne pri zvýšenej teplote, premiestňovať v látkach. Pohyb atómov v tuhom stave sa nazýva **difúzia**. Difúzia je jedným zo spôsobov prenosu hmoty, pri ktorom sa ich častice (atómy, ióny, molekuly) aj vakancie pohybujú vzhľadom k susedným časticiam.

Pretože podstatou difúzie je tepelný pohyb častíc hmoty, je intenzita difúzie výrazne závislá na teplote. K difúzii dochádza v každom skupenstve, v tuhej fáze je však jediným spôsobom prenosu hmoty. Difúziou sa spravidla znižujú koncentračné rozdiely. Difúzia v jednodložkovej sústave alebo fáze sa nazýva **autodifúzia**.

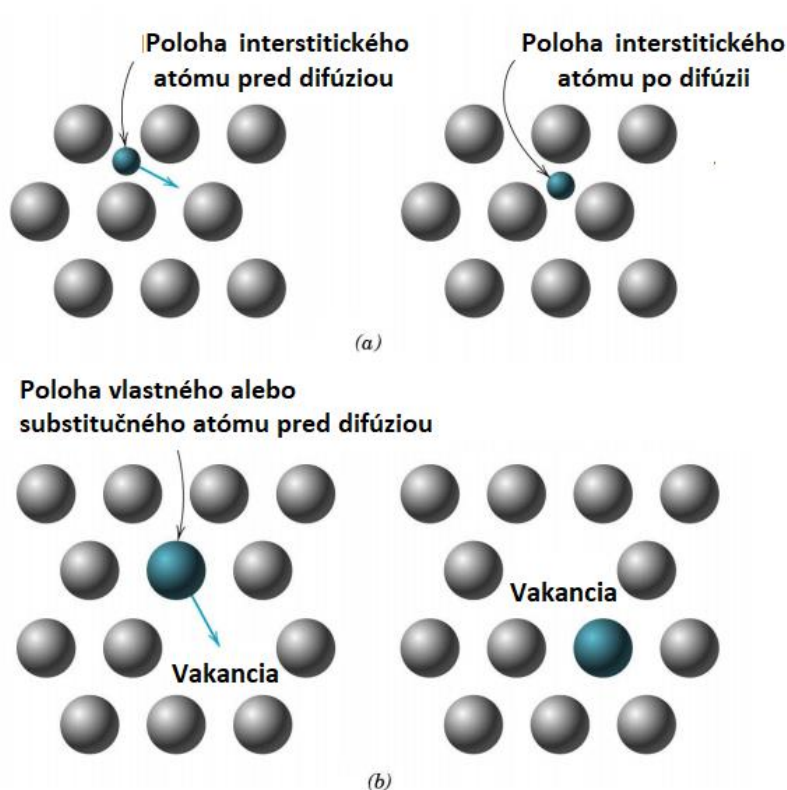
Mechanizmy difúzie v kryštalických materiáloch môžeme rozdeliť na:

- individuálne, pri ktorých sa pohybuje (migruje) jedna častica alebo vakancia nezávisle na ostatných,
- skupinové, ktoré charakterizuje koordinovaný pohyb viacerých častíc.

K individuálnym mechanizmom patrí mechanizmus interstitický (obr. 1.21a) a mechanizmus vakančný (obr. 1.21b), pre ktoré je určujúci pomer veľkostí atómov difundujúceho

a základného prvku. Iba malé atómy môžu difundovať voľnými priestormi v kryštálovej mriežke základného prvku, t.j. interstitickým mechanizmom (napr. v zliatinách železa prvky od vodíku až po kyslík). Interstitický mechanizmus má najmenšiu aktivačnú energiu.

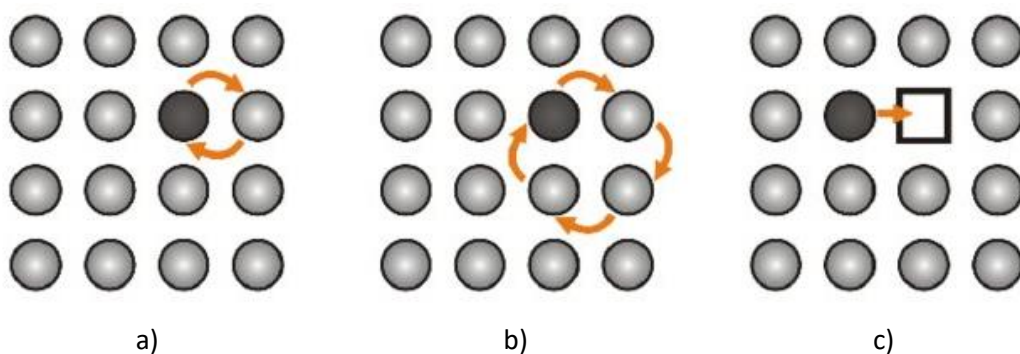
Vakančným mechanizmom, pri ktorom atómy využívajú k svojmu premiestneniu blízke vakancie, difundujú atómy pri samodifúzii a atómy prídavného prvku tvoriace so základným prvkom substitučné tuhé roztoky. Aktivačná energia vakančného mechanizmu je vyššia ako u interstitického.



Obr. 1.21 Individuálne mechanizmy difúzie v kryštalickej mriežke:
a) interstitický b) vakančný

Medzi skupinové mechanizmy patria mechanizmus *výmenný* (obr. 1.22a), *kruhový* (obr. 1.22b) a *nepriamy interstitický* (obr. 1.22c). Pravdepodobnosť výskytu výmenného mechanizmu je malá, nakoľko je tento mimoriadne energeticky náročný. Naproti tomu je kruhový mechanizmus v porovnaní s vakančným náročnejší len asi o tretinu.

Difúziu pri polykryštalických kovoch a zliatinách uľahčujú hranice zŕn, pretože v týchto miestach je najviac porušené usporiadanie atómov. Väčšia hustota porúch urýchľuje difúzne pochody, preto v rovnakom materiáli pri rovnakej teplote prebieha difúzia rýchlejšie vtedy, ak je jemnozrnnejší. Difúziu urýchľujú aj povrchové javy, pretože na povrchu súčiastok je väzba atómov slabšia.



Obr. 1.22 Skupinové mechanizmy difúzie v kryštalickej mriežke
a) výmenný b) kruhový c) nepriamy interstitický

Technický význam difúzie spočíva ako v prospešných, tak aj v škodlivých zmenách koncentrácie a vo fázových či štruktúrnych premenách buď iba v povrchových vrstvách výrobkov alebo i v celom objeme. Prospešným príkladom koncentračných zmien je povrchové zvýšenie obsahu vybraných prvkov pri chemicko-tepelnom spracovaní konštrukčných ocelí, naproti tomu oduhličenie nástrojových ocelí pri ich spracovaní pri vysokých teplotách je škodlivé.

1.3 PLASTICKÁ DEFORMÁCIA MATERIÁLOV A JEJ MECHANIZMY

Veľmi dôležitou vlastnosťou materiálov je ich odpor proti pretvoreniu, t.j. proti pôsobeniu vonkajších síl. Materiál buď mení svoj tvar (deformuje sa) alebo pri dostatočnej veľkosti pôsobiacej sily sa poruší lomom. Proti vonkajším silám pôsobia vnútorné sily, ktoré bránia pretvoreniu. [1,4,7]

Pôsobenie vonkajších síl spôsobí v materiáli napätosť, ktorá sa prejaví určitým rozložením mechanického napätia (v závislosti od spôsobu zaťažovania, veľkosti a smeru pôsobiacej sily, tvaru a rozmerov zaťažovaného materiálu).

Napätie σ je definované ako sila F pôsobiaca na jednotku plochy S zaťažovaného prierezu materiálu v danom okamihu zaťažovania:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2} = \text{MPa}] \quad (2.1)$$

Normálové napätie σ_α má smer kolmý k uvažovanej ploche, *tangenciálne (šmykové) napätie τ_α* pôsobí v uvažovanej ploche, pre ktoré platí, obr.1.23:

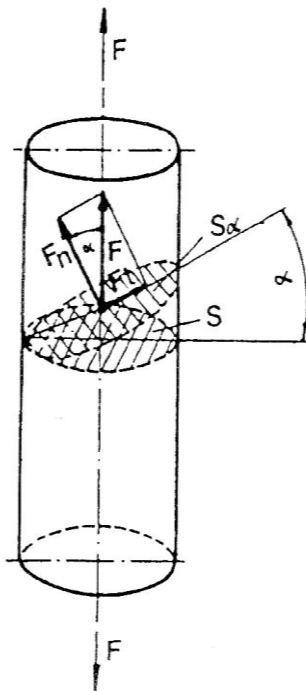
$$\sigma_\alpha = \frac{F_n}{S_\alpha} \quad [\text{MPa}] \quad (2.2) \quad \tau_\alpha = \frac{F_t}{S_\alpha} \quad [\text{MPa}] \quad (2.3)$$

Napätia σ_α a τ_α predstavujú skutočné napätia v zaťažovanom priereze. V priebehu zaťažovania sa však veľkosť plochy prierezu mení a je obtiažne merateľná. Používa sa preto tzv. zmluvné napätie σ vzťahované na počiatočný prierez telesa S_0 :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.4)$$

kde F je pôsobiaca sila a S_0 je pôvodný (nezaťažovaný) prierez.

Deformácia je zmena tvaru a rozmerov telesa pôsobením vonkajších síl. Deformácia môže byť pružná a plastická.



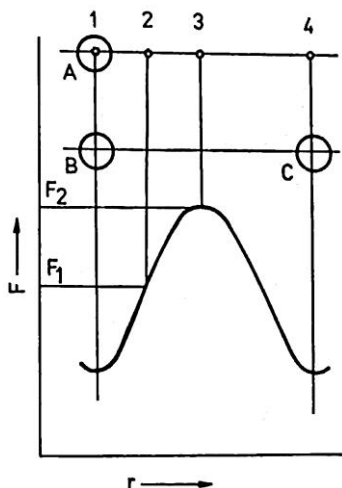
Obr.1.23 Teleso namáhané ťahovou silou v osi valca

Pružná (elastická) deformácia nastáva vtedy, keď vonkajšie sily vyvolávajú len vychýlenie atómov mriežky z ich rovnovážnych polôh. Po odstránení vonkajších síl (keď napätie neprekročilo fyzikálnu medzu pružnosti R_E) sa môžu atómy vrátiť do svojich pôvodných polôh a teleso nadobudne pôvodný tvar. V tomto intervale napätí platí Hookov zákon – lineárna závislosť deformácie na napätí.

Trvalá (plastická) deformácia vyvoláva nevratné zmeny tvaru a teda atómy, ktoré boli vysunuté zo svojich rovnovážnych polôh viac ako o mriežkový parameter, sa nevrátia do pôvodných polôh - nevratná zmena tvaru telesa. Plastická deformácia je premiestňovanie atómov kryštálu na krátku vzdialenosť mechanizmom sklzu alebo dvojčatením, pri rešpektovaní vlastností kryštálovej štruktúry. Vlastnosti kryštálovej štruktúry určuje periodické alebo neperiodické usporiadanie atómov. Pri periodickom usporiadaní sú atómy rozmiestnené rovnovážne v priestorových mriežkach, ktoré určujú fyzikálne vlastnosti ideálnych kovov. Pri neperiodickom usporiadaní sú atómy rozmiestnené nerovnovážne pri poruchách, ktoré určujú fyzikálne vlastnosti reálnych kovov.

1.3.1 Plastická deformácia monokryštálov

Zjednodušený princíp plastického pretvorenia materiálu presunutím (sklzm) jedného atómu vzhľadom k rovine tvorenej rovnakými atómami je znázornený na obr.1.24. Pri posuve atómu A z polohy 1 do polohy 2 je potrebné zvýšiť silu na hodnotu F_1 . Pri ďalšom vzdalovaní atómu A do polohy 3 sila musí rásť až na hodnotu F_2 . V tejto polohe je atóm A rovnako priťahovaný atómom B i atómom C, teda pri ďalšom posuve sa už znižuje potrebná sila až do polohy 4, kedy je atóm A v rovnovážnej polohe vzhľadom na atóm C, a teda s minimom potenciálnej energie. [1,3,4]



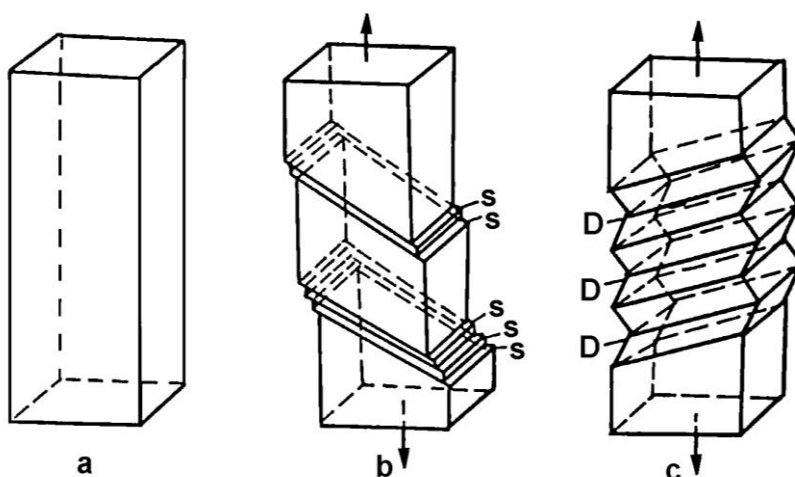
Obr.1.24. Schéma modelu sklzu a závislosť sily potrebnej pre sklz od veľkosti vychýlenia atómu r

Prenesme úvahy na prípad sklzu jedného radu s n -atómami proti radu atómov s n -atómami. Zistili by sme, že rovnaký súčasný posuv celého radu atómov bude vyžadovať n -krát vyššiu silu ako je F_2 . Táto úvaha nie je úplne presná, lebo sme zanedbali vzájomné pôsobenie atómov presúvaného radu a tiež ďalšie faktory. Z tohto modelu bolo určené, že najväčšie kritické šmykové napätie, potrebné na sklz radu atómov je $\tau_{krit} = G/2\pi$, kde G je modul pružnosti v šmyku.

Vysvetlenie rozporu podala až teória dislokácií, ktorá ukázala, že **plastická deformácia sa realizuje sklzm**, teda pohybom čiarových porúch - pohybom dislokácií. Rovina, v ktorej nastáva sklz sa nazýva sklzová rovina. Je to kryštalografická rovina najhustejšie obsadená atómami v

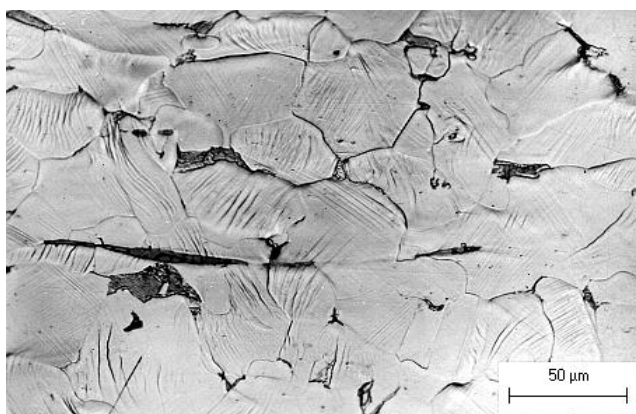
kryštalickej mriežke. Smer sklzu je obvyčajne totožný s najhustejšie obsadeným smerom sústavy atómami. Z možných sklzových rovín a smerov sklzu v kryštalickej mriežke sa aktivujú tie, v ktorých sa dosiahne maximálne šmykové napätie. Počet aktívnych rovín sklzu v sústave závisí od typu kryštalickej mriežky materiálu, od teploty, chemického zloženia a predchádzajúceho stupňa deformácie. Pri vyšších teplotách sa aktivizujú i ďalšie sklzové roviny, čo vysvetľuje lepšiu tvárnosť materiálov za tepla.

Proces plastickej deformácie si teda predstavujeme ako hromadný pohyb v materiáli existujúcich i vznikajúcich dislokácií. Súbor sklzových rovín, kde sa realizoval sklz, vytvorí na povrchu kryštálu (kovu) charakteristické sklzové pásy (stupne), obr.1.25, ktoré sú viditeľné pri pozorovaní povrchu svetelným mikroskopom, obr.1.26. Niektoré materiály v určitých podmienkach (nízka teplota, veľká rýchlosť deformácie) môžu sa deformovať i tvorbou dvojčiat, prebieha **dvojčatenie**. Pri dvojčatení sa veľkou rýchlosťou preklopiť rady atómov v určitej oblasti o určitý uhol k smeru posuvu. Nová mriežka v zdvojenej časti kryštálu má vzhľadom na pôvodnú mriežku zrkadlovo súmernú orientáciu k určitej rovine, ktorú nazývame rovina dvojčatenia – D. Zmena tvaru monokryštálu pri deformácii sklzom a dvojčatením je rozdielna. Deformačné spevnenie pri dvojčatení je podstatne menšie ako pri deformácii sklzom.



Obr.1.25 Schéma deformácie monokryštálu: a – pred deformáciou, b – po deformácii sklzom, c – po deformácii dvojčatením (S – roviny sklzu, D – roviny dvojčatenia)

Plastická deformácia kryštálu začína vtedy, keď priložené vonkajšie sily vyvolajú napätie, ktoré uvedie do pohybu všetky dislokácie schopné pohybu (dislokácie nezachytené prekážkami alebo vzájomným prepletením) na vhodne orientovaných sklzových rovinách, kde bolo dosiahnuté τ_{krit} .



Obr.1.26 Súbor rovnobežných sklzových rovín, na ktorých sa realizoval sklz (dislokáciami)

Dislokácie prebehnú celým kryštálom a hromadia sa na jeho hraniciach pokiaľ sa nezachytili na prekážkach, alebo pokiaľ sa dislokácie, ktoré sa pohybovali po rôznych sklzových rovinách navzájom nezaplietli (nevytvorili zhluk). Na pokračovanie plastickej deformácie musíme potom vonkajšie napätie zvýšiť tak, aby sa dislokácie uvoľnili od prekážok, alebo

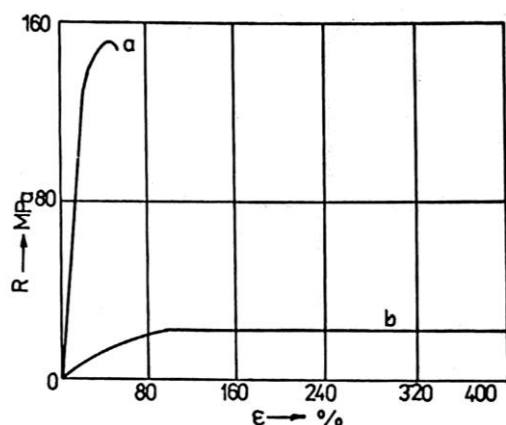
aby sa uviedli do pohybu voľne dislokácie v iných, menej priaznivo orientovaných sklzových rovinách.

Počas plastickej deformácie sa však neuplatňujú len dislokácie prítomné v kryštáloch pred deformáciou, ale i dislokácie, ktoré vznikli počas deformácie z rôznych zdrojov dislokácií. Kov na pokračujúcu plastickú deformáciu teda vyžaduje zvyšovanie vonkajšieho napätia, materiál kladie väčší odpor proti pretváraniu, nastáva deformačné spevňovanie materiálu, pričom materiál postupne stráca možnosť plastickej deformácie - vyčerpávajú sa plastické vlastnosti materiálu a tento sa stáva krehkým.

1.3.2 Deformácia polykryštalického materiálu

Plastická deformácia polykryštalického materiálu je proces podstatne zložitejší ako deformácia monokryštálu. Rôzne orientácie zŕn a ich hranice výrazne vplyvajú na proces sklzu. Niektoré zrná polykryštalického materiálu majú veľmi výhodnú orientáciu vzhľadom k pôsobiacemu zaťaženiu, iné zasa veľmi nevýhodnú. Prvé sa budú deformovať i pri priložení malého zaťaženia, druhé až pri výrazne zvýšenom zaťažení.

Jednotlivé zrná polykryštalickej látky nemôžu meniť svoj tvar ľubovoľne, ale len tak, ako im to susedné zrná umožnia. Polykryštalické kovy s hexagonálnou mriežkou sa pred



Obr.1.27 Závislosť veľkosti deformácie od napätia pre zinok: a – polykryštal, b - monokryštal

porušením lomom deformujú len málo (často len dvojčatením), pretože majú málo sklzových systémov. Kovy s kubickou plošne centrovanou mriežkou majú veľký počet sklzových rovín a smerov, čo vždy umožňuje nájsť vhodne orientované roviny, v ktorých sa realizuje sklz. Preto sú tieto kovy dobre tvarovateľné a tvárniteľné. Kovy s kubickou priestorovo centrovanou mriežkou sú svojimi vlastnosťami medzi kovmi s hexagonálnou a kubickou plošne centrovanou mriežkou.

Hranica zŕn predstavuje výrazne nepravidelné usporiadanie atómov a vytvára neprekonateľné prekážky pre pohyb dislokácií. Potom polykryštalický

kov kladie väčší odpor proti deformácii ako monokryštal, obr.1.27. Z obrázku vidíme, že deformácia pred porušením je pre polykryštalický materiál podstatne menšia ako pre monokryštal, pričom je výrazný rozdiel i v pevnosti v prospech polykryštalického materiálu. Čím menší je rozmer zrna materiálu, tým má materiál lepší komplex mechanických vlastností.

Charakter závislosti „napätie - deformácia“ závisí od predchádzajúceho tvárnenia, deformácie. Opakovaná deformácia (zaťaženie, odľahčenie a znovu zaťaženie) rovnakého druhu (ťah, ťah) zvyšuje odpor kovu proti deformácii (spevnenie), ale opakovaná deformácia nerovnakého druhu (ťah, tlak) odpor znižuje (zmäkčenie). Tento jav sa nazýva **Bauschingerov efekt**.

Plastickou deformáciou sa materiál spevňuje. Deformačné spevnenie sa prejaví vzrastom pevnosti, tvrdosti, medze klzu a znížením plastických vlastností materiálu. Mení sa tiež tvar zŕn ako aj iné vlastnosti materiálu, napr. elektrická vodivosť klesá, znižuje sa

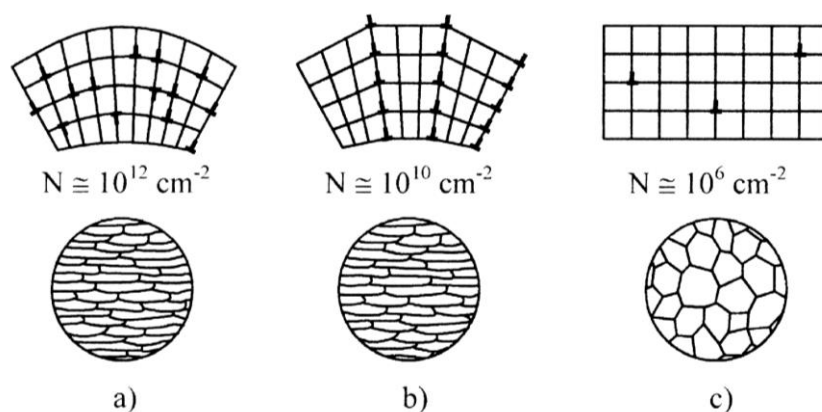
odolnosť proti korózii a pod. Keď tvárnenie prebieha stále v rovnakom smere (napr. valcovanie, preťahovanie), vzniká prednostná orientácia kryštallických mriežok v smere deformácie, vzniká **deformačná textúra**, obr.1.28a, ktorá má za následok výraznú anizotropiu vlastností materiálu – rôzne vlastnosti v rôznych smeroch vzhľadom na smer deformácie.

Pri tvárnení sa zvyšuje hustota mriežkových porúch, predovšetkým dislokácií, napr. z hodnoty 10^{12} m^{-2} na hodnoty asi 10^{16} m^{-2} , čo znamená okrem iného i významné zvýšenie voľnej entalpie sústavy.

1.3.3 Zotavenie a rekryštalizácia

V priebehu plastickej deformácie sa zvýši voľná entalpia sústavy o vloženú deformačnú energiu. Kov je z termodynamického hľadiska menej stabilný. Ak deformačne spevnený kov žiame (ohrev na určitú teplotu a po určitý čas), dodávame sústave aktivačnú energiu. Postupne sa uvoľňuje uložená deformačná energia a znižuje sa voľná entalpia sústavy. Súbežne sa zmenia vlastnosti kovu. Pri ohreve na teploty $T < T_r$ (T_r - rekryštalizačná teplota) dochádza k zotaveniu mriežky, pri ohreve na teploty $T > T_r$ **prebieha rekryštalizácia**. [1]

Zotavenie začína premiestňovaním a znižovaním počtu vakancií. S rastom teploty sa uvoľňujú a premiestňujú niektoré najmenej zachytené dislokácie. Dislokácie sa usporiadajú do pomerne pravidelných buniek, obr.1.28b. Zotavením sa dosiahne pôvodná hodnota elektrického odporu a znižujú sa štruktúrne napätia. Ďalšie vlastnosti, najmä mechanické, sa menia len málo. Deformačná textúra ostáva zachovaná.



Obr.1.28 Zmeny v usporiadaní dislokácií v mriežke, zmeny hustoty dislokácií N v mikroštruktúre pri žíhaní deformovaného materiálu: a – stav v deformovanom materiáli, b – stav po zotavení, c – stav po rekryštalizačnom žíhaní

Rekryštalizácia prebieha tak, že v energeticky najvýhodnejších miestach (miesta s najväčšou deformáciou) vznikajú aktívne rekryštalizačné zárodky nových zŕn bez znakov deformácie. Rekryštalizované zrná nahradia postupne deformovanú štruktúru v celom objeme materiálu. Rekryštalizácia sa od prekryštalizácie (zmeny modifikácie) odlišuje tým, že v jej priebehu vznikajú kryštály s nezmeneným typom mriežky. Veľkosť zrna po rekryštalizácii závisí od stupňa predchádzajúcej deformácie a od teploty rekryštalizácie. V kove, ktorý sa intenzívne tvárnil vzniká pri žíhaní veľké množstvo rekryštalizačných zárodkov a výsledkom je

jemnozrnná štruktúra. Po malej deformácii nové zrná rastú iba z malého počtu zárodkov a tým zrno výrazne rastie. Rekryštalizáciou sa získa nielen pôvodná (preddeformačná) štruktúra, obr.1.28c, ale aj pôvodné fyzikálne a mechanické vlastnosti.

Rekryštalizačná teplota T_r (v čistých kovoch je $T_r = (0,35 - 0,4) T_t$, kde T_t je teplota tavenia v K) je dôležitým kritériom na rozdelenie procesov tvárnenia (deformácie) z hľadiska teploty. Tvárnenie za studena sa uskutočňuje pri teplotách nižších ako je rekryštalizačná teplota, pričom nastáva spevňovanie a ďalšie zmeny vlastností. Tvárnenie za tepla prebieha pri vyšších teplotách ako rekryštalizačná teplota, preto ohrev na tvárniacu teplotu zabezpečuje bezprostrednú rekryštalizáciu po tvárnení a kov sa nespevňuje buď čiastočne alebo vôbec.