

## 4. Poruchy krystalové mřížky.



### Cíl:

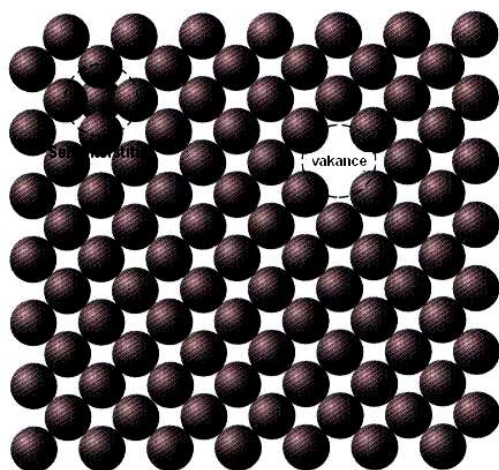
Až do 30. let minulého století nepovažovali vědci za důležité zabývat se otázkou, jaký vliv mají např. cizí atomy (příměsi a nečistoty), nebo i jiné poruchy na vlastnosti pevných látek. Teprve výrazný pokrok v metodách, umožňujících výrobu velmi čistých materiálů, se stal podnětem pro studium tohoto problému a přinesl a stále přináší velmi výrazné technologické aplikace (od slitin kovů s požadovanými mechanickými vlastnostmi až po miniaturní elektronické součástky). Cílem kapitoly je seznámení čtenáře s druhy a vlastnostmi jednotlivých významných poruch krystalického uspořádání pevných látek.

Poruchy krystalové mřížky lze rozdělit podle různých hledisek. Z nich nejpřirozenější se zdá rozdělení podle dimenze, tj. na *poruchy bodové* (bezrozměrné), *čárové* (jednorozměrné), *plošné* (dvojměrné) a *objemové* (trojrozměrné).



### 4.1. Bodové poruchy.

Krystalovou mřížku je třeba chápat jako dynamický útvar. Mezi jednotlivými atomy působí síly přitažlivé a odpudivé (které si lze představit jako malé pružinky) a při jakékoliv teplotě  $T > 0$  K konají atomy kmity, jejichž amplituda roste s teplotou. Potom je jistě názornou představa, že některý z atomů může náhodně získat od svých sousedů tolik energie, že zpřetrhá své vazby s nimi a usadí se buď na povrchu krystalu (Schottkyho mechanismus), nebo uvnitř krystalu v místě, kde se žádný atom nenachází (meziuzlová, *intersticiální* poloha, Frenkelův mechanismus). Prázdné místo v krystalové mřížce se nazývá *vakance* (Obr.4.1).



Obr.4.1. Vakance (Frenkelův mechanismus)

#### 4.1.1. Vlastnosti vakancí.

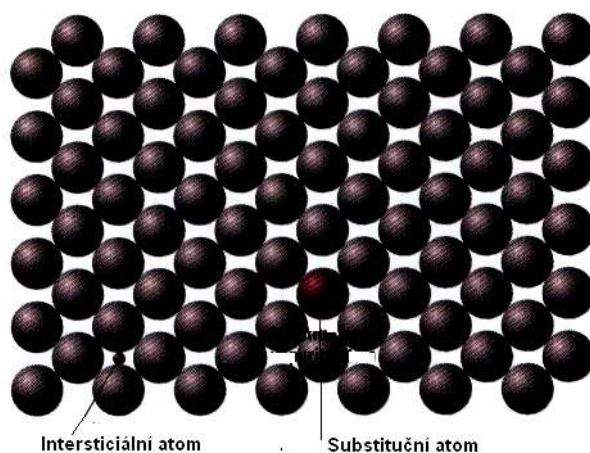
Výpočty, založené na termodynamických principech ukazují, že při každé teplotě, větší než 0 K je v krystalu přítomen jistý počet vakancí (tzv. *rovnovážná koncentrace vakancí*) a ten roste s teplotou exponenciálně. Jinými slovy, nelze nijakým způsobem vyrobit krystal bez vakancí (při  $T > 0$  K).

Vakance se mohou v krystalu pohybovat (tzv. *migrace vakancí*) a to tím snadněji, čím je vyšší teplota krystalu. Energie jednotlivé vakance (monovakance) je v absolutní hodnotě velmi malá a proto ji vyjadřujeme pomocí vedlejší jednotky v soustavě SI, v tzv. elektronvoltech eV (elektronvolt je energie, kterou získá elektron průchodem potenciálovým rozdílem 1 V.  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ). Z energetického hlediska je pro vakance výhodné spojit se ve větší celky např. *divakance* (dvě vakance), *trivakance*, atd. Spojování ve větší celky (trivakance a více) však brání entropický princip, tj. snaha po co největší neuspořádanosti. Koncentrace divakancí je úměrná koncentraci vakancí a většinou je menší, než 10 % z celkové koncentrace vakancí. Divakance jsou z pochopitelných důvodů pohyblivější, než monovakance.

#### 4.1.2. Příměsi v pevných látkách.

Dokonale čistý krystal (např. kovu), skládající se pouze z jednoho druhu atomů, nelze vyrobit. I velice čistý materiál (99,9999 %) obsahuje v  $1 \text{ m}^3$  asi  $10^{23}$  atomů nečistot (pokud jsou cizí atomy nežádoucí, nazýváme je *nečistotami*, v opačném případě *příměsemi*) Atom příměsi se může v krystalu nacházet buď v substituční, nebo intersticiální poloze (Obr.4.2). Podle toho hovoříme o slitině substituční, nebo intersticiální (*substituční*, nebo *intersticiální tuhý roztok*). Teorie slitin vysvětluje, proč jsou některé atomy příměsi dobře a jiné málo rozpustné v daném krystalu. Hlavními faktory, které ovlivňují rozpustnost atomů, jsou:

- Atomový rozměrový faktor.* Pokud se liší atomové poloměry rozpouštědla a rozpouštěných atomů o méně než 15 %, je rozpustnost obvykle dobrá.
- Krystalová struktura.* Pro dobrou rozpustnost dvou látek je potřebná stejná krystalová struktura.
- Elektronegativita.* Čím je jeden prvek více elektronegativní a druhý elektropozitivní, tím menší je pravděpodobnost vzniku substitučního tuhého roztoku.
- Mocenství.* V kovu s určitým mocenstvím se snadněji rozpouští kov s vyšším mocenstvím, než s mocenstvím nižším.



Obr.4.2. Atomy příměsi v krystalu.

Složení tuhého roztoku udáváme buď ve váhových procentech (wt. %), nebo v atomových procentech (at. %). Váhová procenta vypočítáme jako poměr hmotnosti příměsi k celkové hmotnosti slitiny a atomová procenta jako počet molů příměsi k celkovému počtu molů prvků ve slitině.

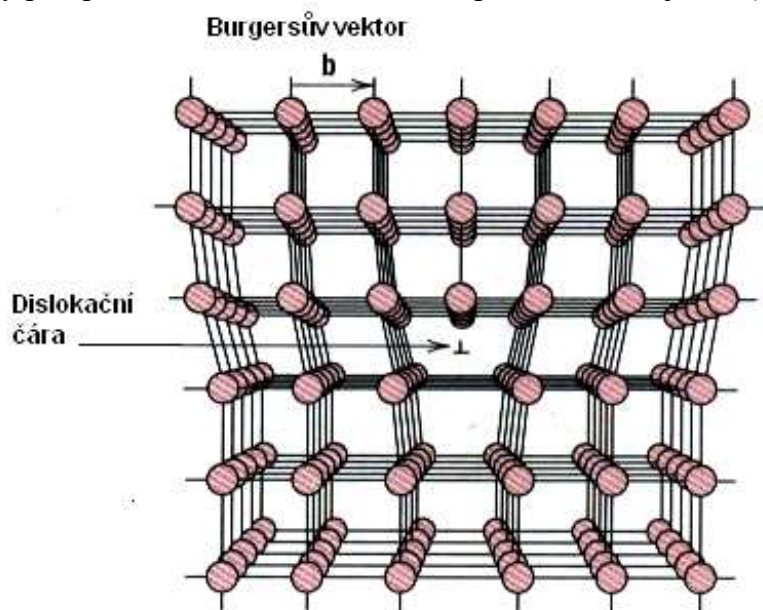
## 4.2. Čárové poruchy.

Čárová porucha, zvaná dislokace má velmi zajímavou historii. Na základě nepříliš složité teorie vypočetl Frenkel velikost tzv. *kritického skluzového napětí*, tj. napětí, potřebného pro vznik plastické deformace kovů. Bylo však zjištěno, že tato teoretická hodnota je o několik řádů vyšší, než hodnota, získaná experimentálně. Proto byla navržena nejdříve jako modelová představa porucha, nazvaná dislokace, která měla zjištěný velký rozdíl vysvětlit. Byla vytvořena složitá a matematicky náročná teorie dislokací a teprve po více než 10 letech byla bezpečně potvrzena experimentálně. Je třeba poznamenat, že všechny experimentálně zjištěné vlastnosti dislokací se velmi přesně shodovaly s teoretickým modelem. To lze chápat jako jedno z velkých (ale málo známých) vítězství exaktní vědy – fyziky.

Dislokace vznikají vždy, když v krystalu působí mechanické napětí (při tuhnutí, při plastické deformaci). Dislokace není rovnovážnou poruchou jakou je vakance a tak lze i při teplotách vyšších, než 0 K vyrobit krystal bez dislokací (i když je to náročné). Existují dva základní druhy dislokací, *dislokace hranová* a *dislokace šroubová*. Dislokace, která má vlastnosti obou, se nazývá *dislokace smíšená*. Dislokace je z atomového hlediska „obrovským“ útvarem, neboť začíná a končí na stěnách krystalu, nebo se váže sama na sebe (tvoří smyčku) a obsahuje tedy nepředstavitelné množství atomů.

### 4.2.1. Dislokace hranová.

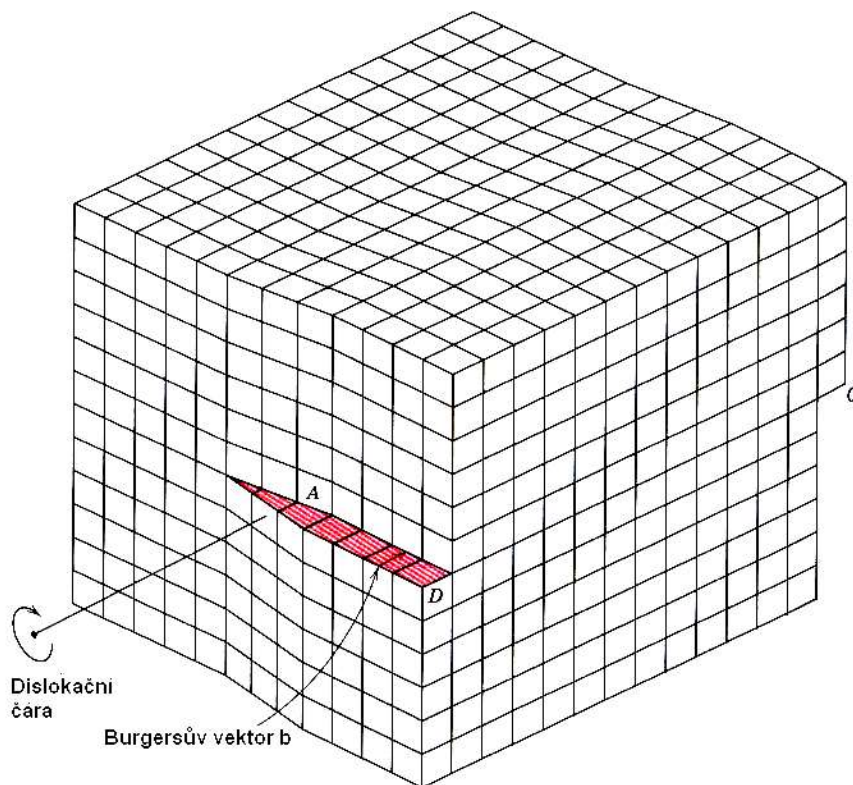
Na Obr. 4.3 je schematicky znázorněna hranová dislokace. V obrázku je zakreslen tzv. *Burgersův vektor*  $\mathbf{b}$ , který zkonstruujeme tak, že kolem dislokace vytvoříme *Burgersovu smyčku*, skládající se ze stejného počtu kroků doprava jako doleva a nahoru jako dolů. Volný vektor  $\mathbf{b}$ , který smyčku uzavírá, je kolmý na dislokační čáru (hranu nadbytečné poloroviny) a vytváří s ní tzv. *skluzovou rovinu*, v níž se hranová dislokace pohybuje. Pohyb dislokace je velmi „úsporný“, probíhá tak, že v důsledku kmitů mřížky se naruší vazby v okolí dislokace a ta se posune o jednu meziatomovou vzdálenost (úspornost pohybu dislokace je důvodem, proč je experimentální kritické skluzové napětí mnohokrát nižší, než vypočtené – Frenkelův model vycházel z předpokladu posuvu části krystalu nad skluzovou rovinou vůči části pod ní jako celek, tedy předpokládal narušení obrovského počtu vazeb najednou).



Obr.4.3. Hranová dislokace

### 4.2.2. Dislokace šroubová.

Šroubová dislokace ( Obr.4.4) vznikne tak, že rozříznutý krystal podrobíme stříhové deformaci. Burgersův vektor této dislokace je rovnoběžný s dislokační čarou a existuje tedy velký počet skluzových rovin, v nichž se dislokace může pohybovat (dislokační čára je osou svazku všech těchto skluzových rovin).



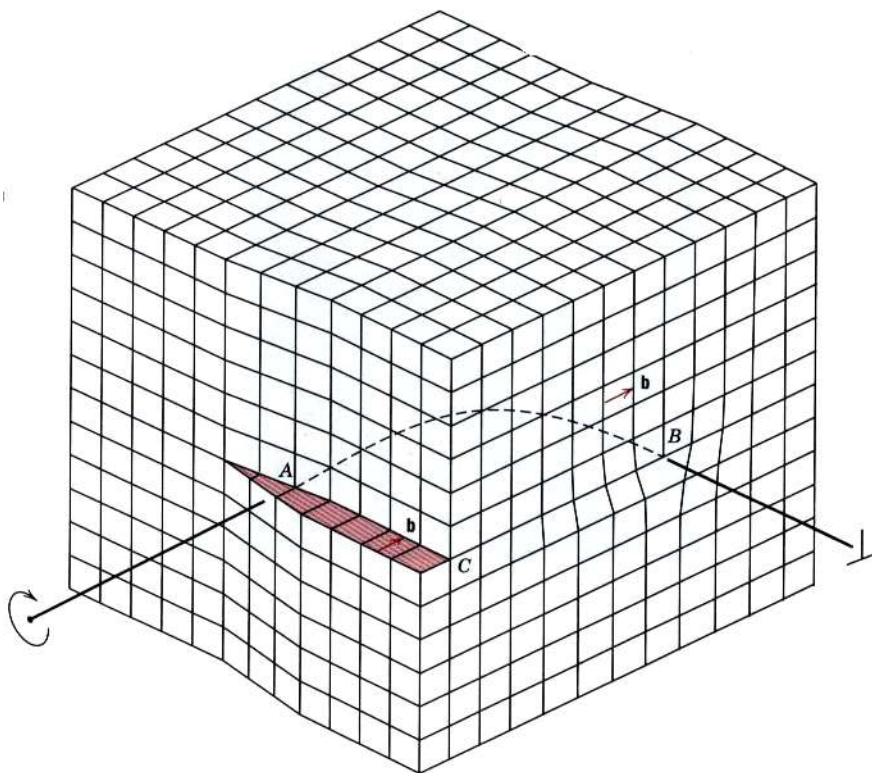
Obr.4.4. Šroubová dislokace.

Na Obr. 4.5. je znázorněna smíšená dislokace jako nejobecnější druh dislokace, obsahující v sobě jako krajní případy dislokaci hranovou a šroubovou.

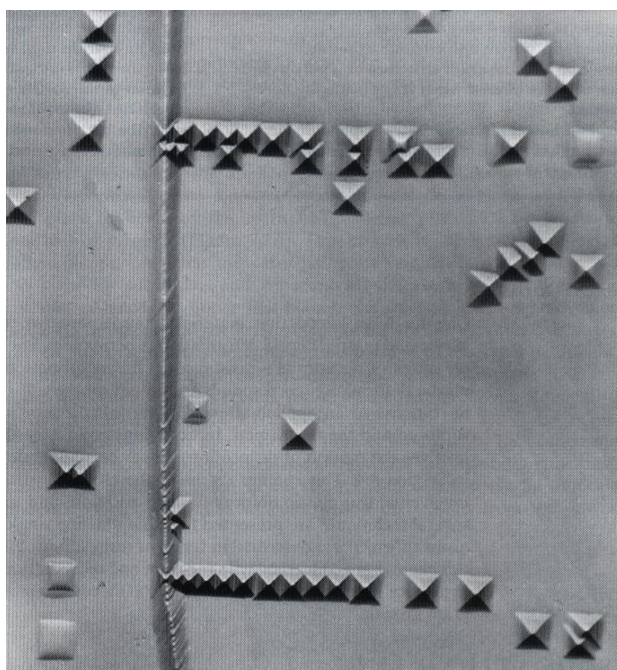
### 4.2.3. Důkazy existence dislokací.

#### a) Leptové důlky.

Z Obr.4.3 plyne, že v místě, kde hranová dislokace (ale totéž platí i pro dislokaci šroubovou) vychází na povrch krystalu, se nachází atom s volnou vazbou a navíc je tam jiná hodnota povrchové energie, než má volný povrch. Ve speciálně vybraném leptadle pak dojde k přednostnímu naleptání okolí dislokace a v optickém mikroskopu můžeme po omytí a osušení povrchu pozorovat leptové důlky (Obr. 4.6).



Obr.4.5. Smíšená dislokace se svými krajními případy, dislokací hranovou a šroubovou..



Obr.4.6. Leptové důlky (monokrystal NaCl).

b) Rentgenová a transmisní elektronová difrakce.

Okolí dislokace lze chápat jako narušení periodicity krystalových rovin. Proto ozáříme-li takové místo rentgenovými paprsky, budeme pozorovat narušení původně pravidelného difrakčního obrazu (Obr.4.7.). Podobně je tomu i v případě, že ozáříme tenkou kovovou fólii (s dislokacemi) paprskem elektronů. Dojde k difrakci elektronů na dislokacích a výsledek se opět projeví na transmisní elektronové mikrofotografii (Obr.4.8). Blíže si obou experimentálních metod všimneme ve zvláštní kapitole.



Obr.4.7. Rentgenová topografie podle Langa (tenká hliníková fólie)



Obr.4.8. Elektronová transmisní mikrofotografie (titan).

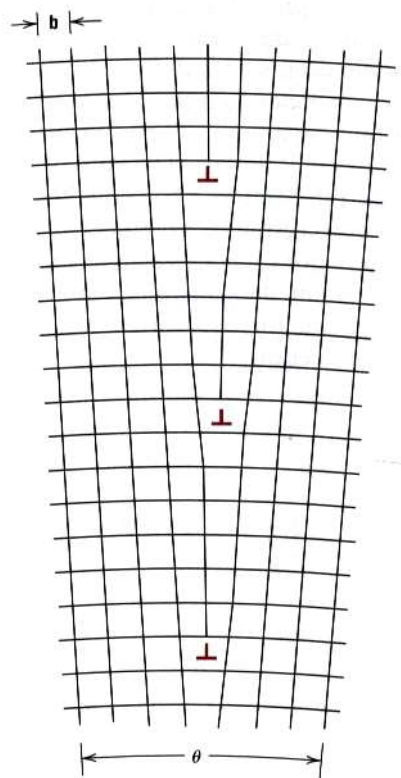
### 4.3. Plošné poruchy.

#### 4.3.1. Povrch krystalu.

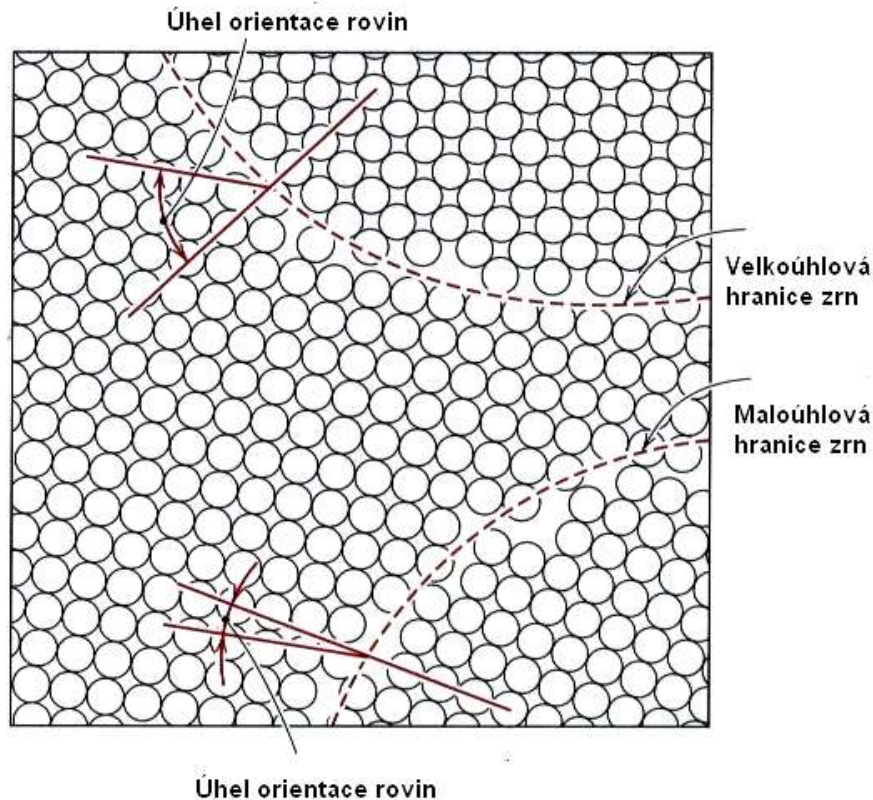
Na atom, nacházející se uvnitř pevné látky působí všechny okolní atomy stejnou silou, takže výslednice sil, které na něj působí bude nulová. Jinak tomu je na povrchu krystalu, tam je výslednice sil od okolních atomů nenulová a působí směrem dovnitř krystalu (je to obdoba pojmu „povrchové napětí kapalin“, kterému bude věnována zvláštní kapitola). Jinými slovy, povrch krystalu má oproti vnitřku krystalu navíc tzv. *povrchovou energii* a proto jej lze pokládat za zvláštní druh poruchy.

#### 4.3.2. Hranice zrn.

Již jsme se zmínili o tom, že oblast mezi zrny v polykrystalech se nazývá hranice zrn. Posláním této hranice je nějakým způsobem zajistit přechod od jednoho zrna (a v něm orientovaných krystalových rovin) k zrně druhému (s jinak orientovanými krystalovými rovinami). Hranice zrn dělíme na *maloúhlové* a *velkoúhlové*. Maloúhlová hranice je zobrazena na Obr. 4.9. Vidíme, že je tvořena řadou hranových dislokací. Velkoúhlová hranice zrn je složitější a je uvedena na Obr.4.10.



Obr.4.9. Maloúhlová hranice zrn



Obr.4.10. Porovnání malouhlové a velkouhlové hranice zrn v krystalu.

#### 4.4. Objemové poruchy.

Mezi objemové poruchy řadíme trhliny a částice jiné fáze (precipitáty), přítomné v krystalu. Zmíníme se o nich podrobně později.



#### 4.5. Kontrolní otázky

- 4.5.1. Popište pohyb monovakance a divakance. Která je pohyblivější?
- 4.5.2. Objasněte proč je cín dokonale rozpustný v mědi a uhlík jenom velmi omezeně rozpustný v železe (ocel).
- 4.5.3. Objasněte, která dislokace je pohyblivější, hranová či šroubová ?
- 4.5.4. Co se stane, vyjde – li dislokace na povrch krystalu ?
- 4.5.5. Které fyzikální vlastnosti pevných látek jsou nejvíce ovlivněny dislokacemi ?
- 4.5.6. Objasněte, proč se při zviditelňování dislokací a hranic zrn používá leptání pomocí kyselin a hydroxydů.
- 4.5.7. Objasněte fyzikální princip kalení a žíhání (využijte principu minima energie a maxima entropie).



## 5. Zpevnění materiálu.



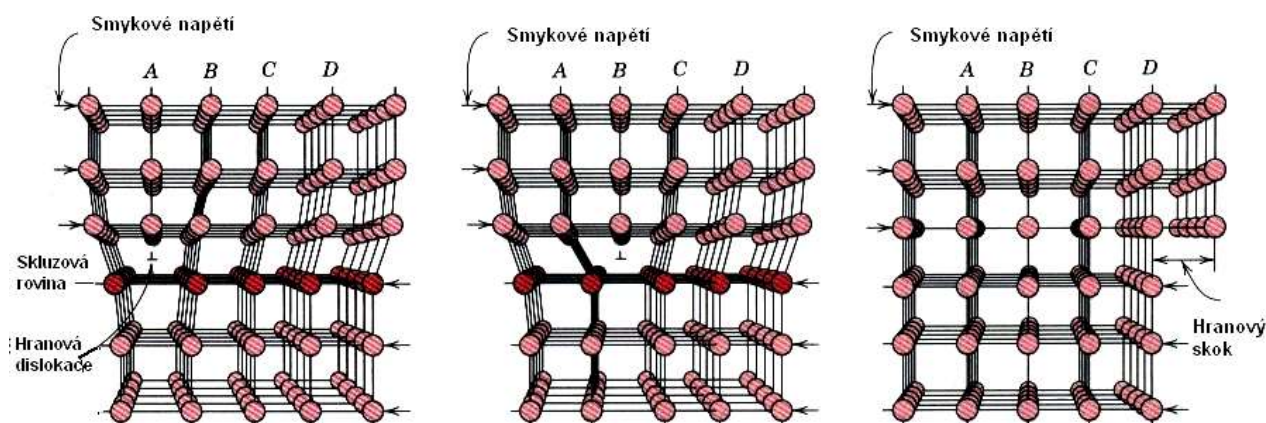
Cíl:

V předcházejících kapitolách jsme se seznámili se strukturou, meziatomovými silami a poruchami krystalové mříže pevných látek. Mechanické vlastnosti pevných látek ( a zejména kovů) jsou nejvíce ovlivňovány dislokacemi. Zjednodušeně se dá říci, že v oblasti pružné se dislokace ještě nepohybují a teprve od okamžiku, kdy napětí, působící na dislokaci překročí jistou mez a dislokace se dají do pohybu, dá se hovořit o plastické deformaci. Protože pohyb dislokací je tak důležitý zejména pro charakterizování plastických vlastností látek, všimneme si nejprve podrobněji právě pohybu dislokací.



### 5.1. Pohyb dislokací.

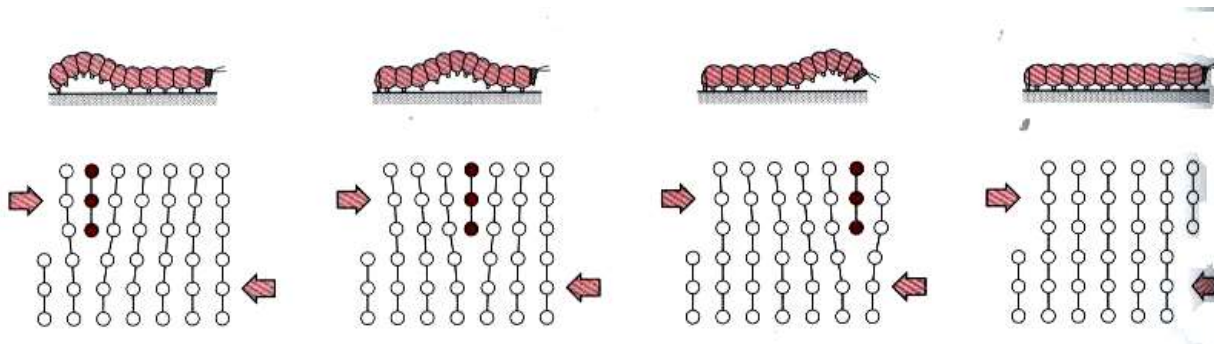
V odstavci 4.2. jsme podrobně popsali všechny tři typy dislokací a základní veličiny, které je charakterizují (Burgersův vektor, dislokační čáru a skluzovou rovinu). Znovu je třeba zdůraznit, že celá krystalová mřížka je útvarem dynamickým, tj. že všechny atomy mřížky kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Na Obr.5.1 je schematicky znázorněn pohyb hranové dislokace. Plyne odtud, že na pohybu dislokace se účastní pouze atomy v okolí hrany nadbytečné poloroviny. Kromě toho je důležité, že atomy této hrany mají volnou, nenasycenou vazbu. Atomy dislokace kmitají a mohou se navázat na atomy, nacházející se pod skluzovou rovinou, u nichž se při kmitání narušily vzájemné vazby. Nebude-li působit na dislokaci žádné napětí, bude dislokace kmitat kolem rovnovážné polohy. Působí-li však skluzové napětí např. ve směru zleva doprava, bude se dislokace pohybovat také tímto směrem a výsledkem bude skok o velikosti Burgersova vektoru na povrchu krystalu (řádově  $10^{-10}$  m). Tento skok lze potom chápat jako jakési „kvantum“ plastické deformace.



Obr.5.1. Pohyb hranové dislokace.

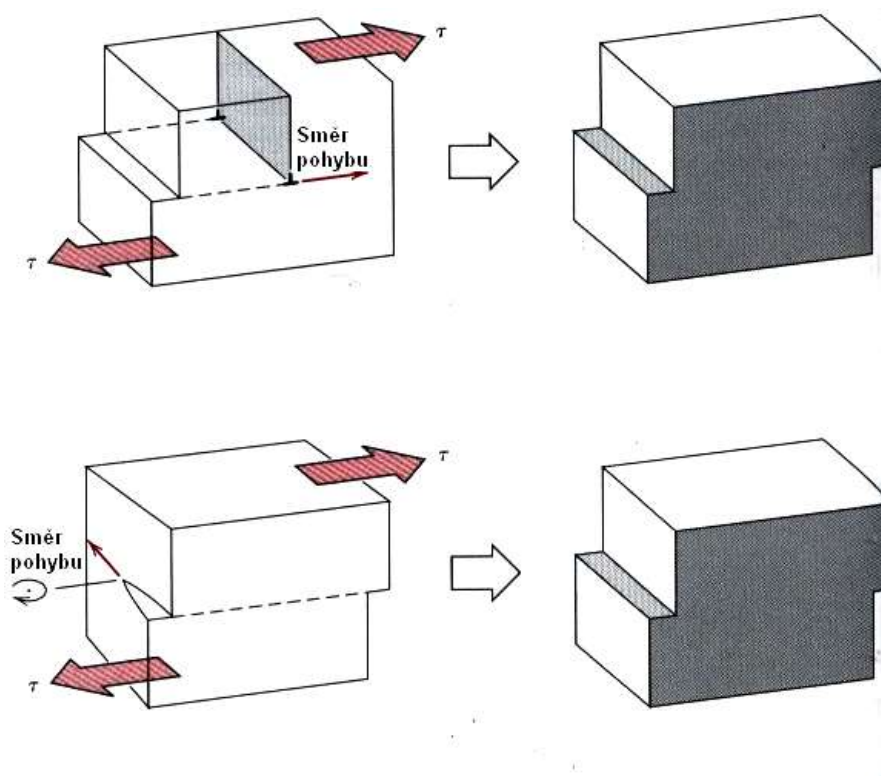
Pohyb dislokace lze tedy přirovnat k pohybu některých živočichů, jako je například píďalka (Obr.5.2). Ta se pohybuje s vynaložením minimální energie tak, že na svém těle vytvoří malé vyvýšení, které se posouvá podél celé délky těla, až dojde k posunutí celého jejího těla. Podobně se pohybují hadi, dešťovky, housenky apod., ale téhož principu se

používá například i při kladení koberců. Z makroskopického hlediska je pohyb dislokace hranové a šroubové a jeho výsledek znázorněn na Obr.5.3.



Obr.5.2. Názorné objasnění pohybu dislokace.

Pro objasnění plasticity kovů je třeba ještě zdůraznit další skutečnost: kolem dislokace existuje napěťové pole nad dislokací kompresní a pod ní dilatační (Obr.5.4)

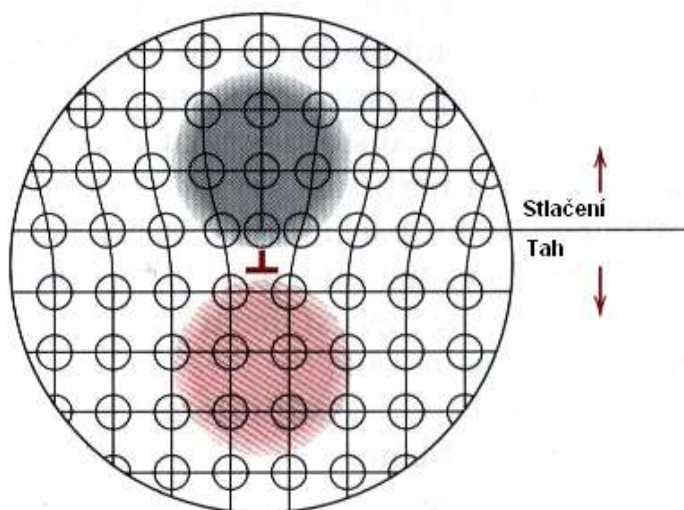


Obr.5.3. Makroskopické znázornění pohybu dislokace hranové a šroubové.

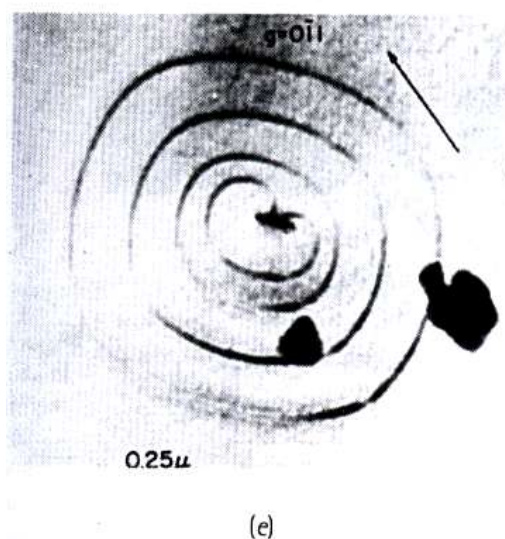
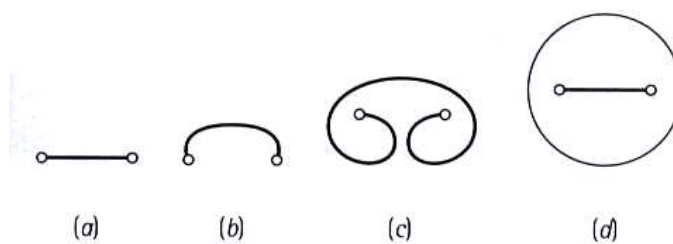
Za povšimnutí stojí i z obrázků dislokace plynoucí skutečnost, že těsně pod dislokační čarou je „více místa“, než nad ní. Navíc je zde řada atomů s volnými nenasycenými vazbami. To má za následek různé zajímavé jevy, jako je například difúze podél dislokace (pipe diffusion), koroze, změna elektrické vodivosti, dekorování dislokací, apod.

Dosud popsaný mechanismus pohybu dislokací by měl teoreticky za následek vznik bezdislokačního (ideálního) krystalu, neboť po aplikaci vnějšího napětí by všechny dislokace „vyšly“ na povrch krystalu. Experimentální výsledky jsou však naprosto odlišné – během plastické deformace hustota dislokací neklesá, ale naopak prudce narůstá. Mechanismus, vysvětlující proč tomu tak je, navrhli Frank a Reed. Je to tzv. Frankův – Reedův (F-R) zdroj

dislokací (Obr. 5.5), který může „emitovat“ obrovské množství dislokací, odpovídající makroskopické deformaci.

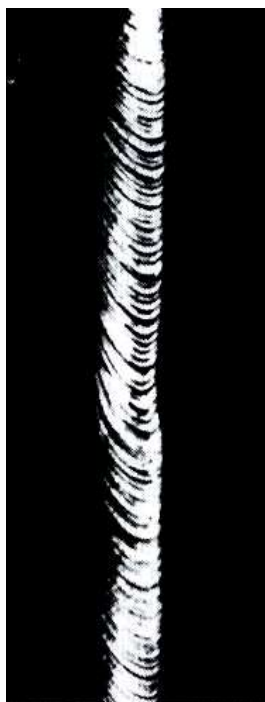


Obr.5.4. Kompresní a dilatační pole napětí v okolí hranové dislokace.



Obr.5.5. Schéma činnosti Frankova-Reedova zdroje dislokací a jeho skutečná fotografie (elektronový mikroskop)

Zpravidla se dislokace, vytvořené F-R zdroji pohybují v jedné, nebo v několika těsně spolu sousedících skluzových rovinách, zatímco ve vzdálenějších rovnoběžných rovinách ne. Vznikají tak tzv. skluzové pásy a celý obraz plastické deformace je nehomogenní (Obr.5.6 a a b). Na tomto obrázku jsou zobrazeny skluzové pásy, které vznikly při deformaci monokrystalu zinku. Skluzové pásy vznikají i při deformaci polykrystalů (Obr. 5.7, polykrystalická měď).



a)



b)

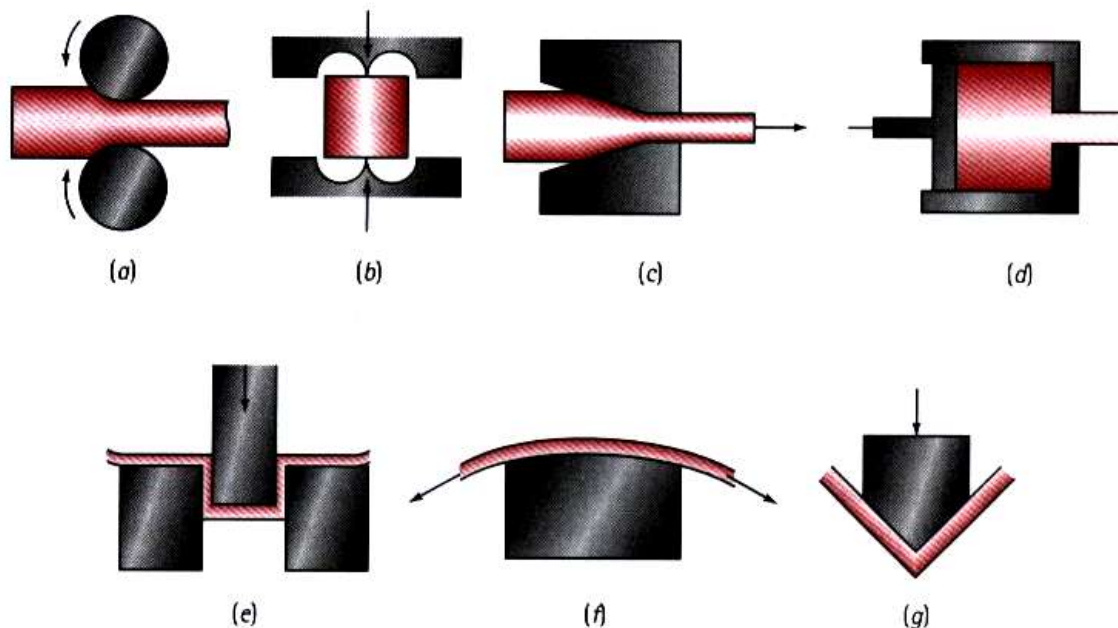
Obr.5.6. Skluzové pásy v monokrystalu zinku (a) a polykrystalu mědi (b)

Závěrem tohoto odstavce si můžeme shrnout jeho základní myšlenku. Protože plastická deformace vzniká v důsledku pohybu dislokací, je základní strategií všech technologických postupů, jejichž výsledkem má být materiál daných vlastností, ovlivňování pohybu dislokací. Chceme – li vyrobit materiál velmi tvrdý (ale bohužel křehký), musíme pohyb dislokací co nejvíce omezit. Naopak v kujném (tažném) materiálu se dislokace mohou pohybovat. Je však ještě další cesta – vyrobit a používat tzv. bezdislokační materiál, který má velkou, tzv. ideální pevnost. Výroba takových materiálů je sice možná, je však velmi drahá a takové materiály nemusí být dostatečně stabilní (trhlínky na povrchu krystalu mohou být zdrojem dislokací).

V dalších odstavcích si stručně vedeme hlavní možné způsoby ovlivňování pohybu dislokací (tzv. mechanismy zpevnění).

## 5.2. Deformační zpevnění.

Významnou překážkou v pohybu dislokací jsou dislokace v jiných skluzových rovinách, tzv. „dislokace lesa“. Proto během plastické deformace pozorujeme kladnou hodnotu směrnice křivky  $\sigma = f(\varepsilon)$ , tzv. *koeficient zpevnění* – viz například Obr.(6.5.- 6.9). Deformační zpevnění je v praxi užíváno již odedávna. Například kováním ostří kosa dosáhneme nejen jeho ztenčení (což bychom mohli provést snadněji broušením), ale zejména zpevnění ostří (které bude ale křehčí). Přitom zbytek kosa nebude křehký (což by bylo nevhodné, neboť by se lámala). Deformačního zpevnění používali kováři a platněři dávnověku i novověku a je využíván i v současnosti (tzv. *tváření za studena* – Obr.5.7) s tím rozdílem, že kovové součástky nejsou kovány ručně, ale pomocí bucharů a lisů.

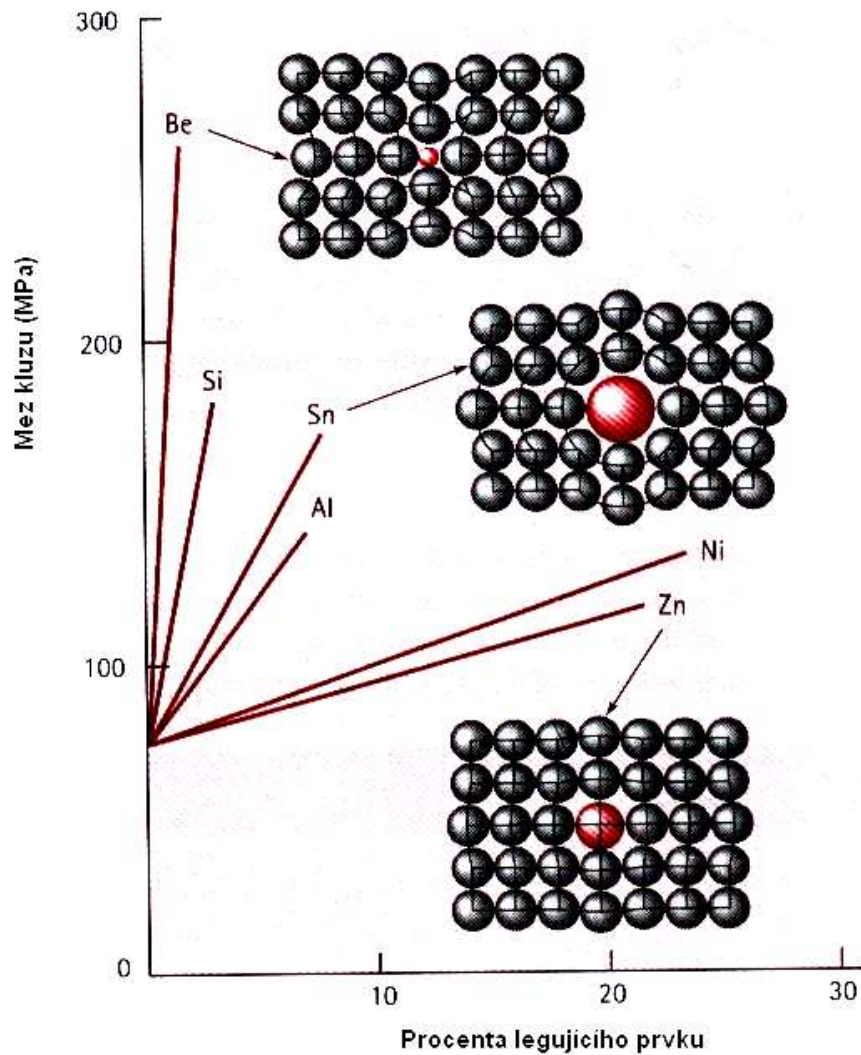


Obr.5.7. Různé způsoby strojního tváření za studena: a) válcování, b) kování, c) tažení, d) protlačování, e) hluboké tažení, f) tváření tažením, g) ohýbání.

## 5.3. Příměsově zpevnění.

Příměsově zpevnění materiálu zná lidstvo už asi 5600 let, neboť v té době začíná přibližně doba bronzová. Právě v té době, neznámo kde, člověk objevil skutečnost, že vzájemným slitím dvou měkkých kovů, tj. mědi (44 HB) a cínu (4 HB) lze získat mnohem tvrdší slitinu, zvanou bronz (360 HB). Zde je HB tvrdost podle Brinella – viz další kapitola.

V odstavci 4.2.2. jsme diskutovali vliv atomů příměsí na jejich rozpustnost v atomech základního prvku. Dá se předpokládat, že podobný vliv budou mít atomy příměsí i na mechanické vlastnosti vzniklé slitiny. Z Obr. 5.8. vidíme, jaký vliv má rozdíl poloměrů atomů příměsí a základního prvku na velikost meze plasticity slitiny (v okolí větších, nebo menších atomů vzniká velké napěťové pole a oblastí, v níž jsou taková pole rozmístěna, se dislokace obtížněji „prodírají“). Pokud jsou poloměry obou druhů atomů přibližně stejné, je vliv atomů příměsí nepřilíš velký (daný zřejmě pouze rozdílem vazeb mezi atomy základního prvku mezi sebou a atomy příměsí a atomy základního prvku navzájem – Zn a Ni v Cu). Je-li rozdíl poloměrů atomů příměsí a atomů základního prvku větší, je vliv atomů příměsí na mez plasticity slitiny mnohem zásadnější (Al, Sn a Si, Be v Cu).



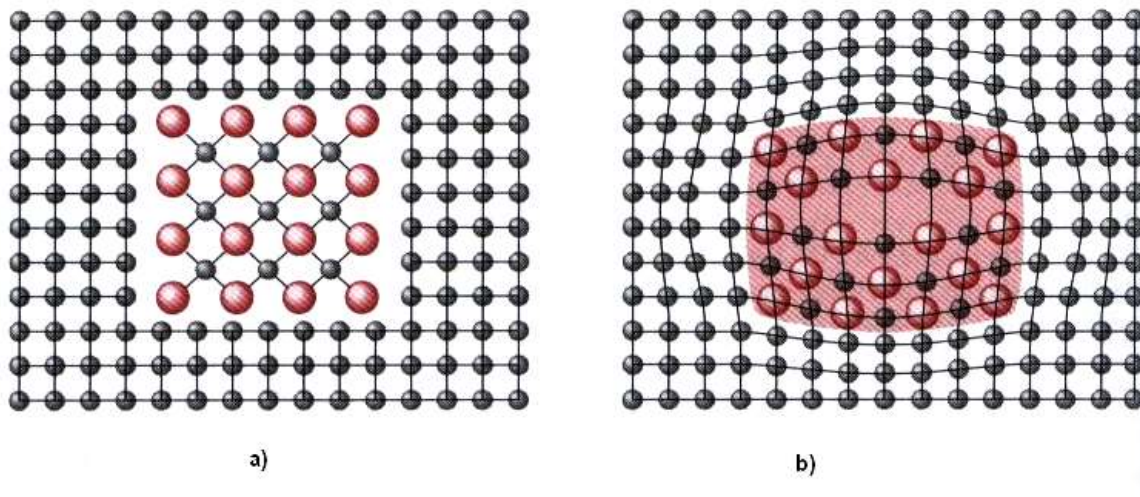
Obr.5.8. Vliv velikosti atomů příměsí na zpevnění mědi.

Závěrem odstavce shrňme kvalitativně vše, co známe o vlivu atomů příměsí na vlastnosti slitin:

- Mez plasticity, zpevnění a tvrdost slitiny je větší, než pro čistý kov, jeden, nebo druhý).
- U většiny slitin je jejich tažnost menší, než tažnost čistého kovu (výjimkou je mosaz, CuZn)
- Elektrická vodivost slitiny je mnohem nižší, než vodivost čistého kovu (příměsí, nebo matrice).

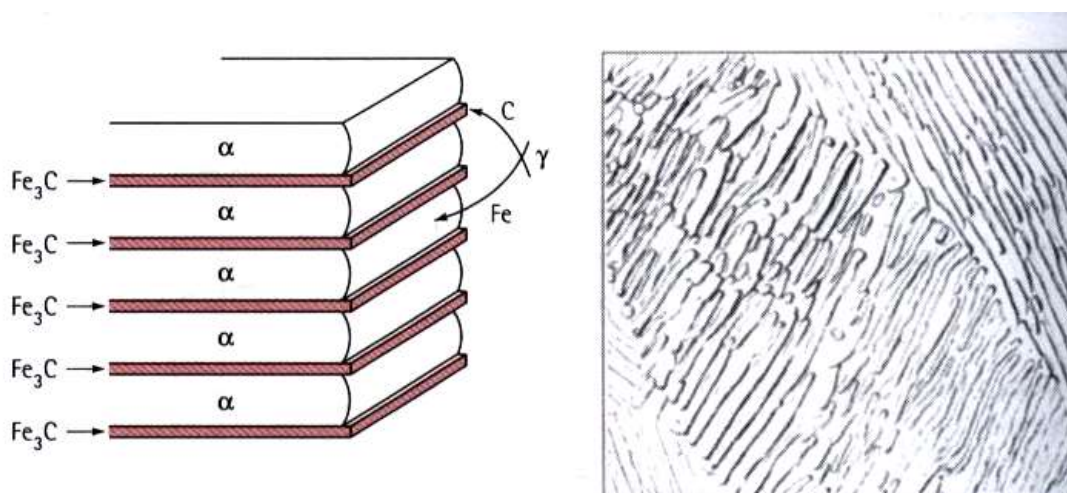
## 5.4. Precipitační zpevnění.

V odstavci 4.2.2. jsme kromě jiného uvedli, že rozpustnost některých prvků v jiných může být dosti omezená. Fyzikální stránky tohoto problému si ještě všimneme podrobněji, zatím stačí poznamenat, že v případě omezené, nebo nulové rozpustnosti vznikají v materiálu matrice tzv. *vměstky*, neboli *precipitáty*. Jsou to tzv. částice druhé fáze, které mají často zcela odlišné fyzikální a chemické vlastnosti a krystalickou strukturu. Jako příklad uvádíme na Obr.5.9 a,b. schematické znázornění tzv. koherentního a nekoherentního precipitátu.



Obr.5.9. Nekoherentní a) a koherentní precipitát b).

Z obrázku je na první pohled jasné, že oba druhy precipitátů jsou značnou a většinou nepřekonatelnou překážkou pro pohyb dislokací. Typickým materiálem, ve kterém se vyskytují precipitáty různého složení i různého tvaru je ocel, což je slitina železa a uhlíku. Precipitáty v oceli jsou tvořeny většinou karbidem křemíku  $\text{Fe}_3\text{C}$ , který mívá tvar kuliček, destiček, nebo má tvar nepravidelný (Obr.5.10)



Obr.5.10 Schematický tvar precipitátů  $\text{Fe}_3\text{C}$  a skutečný snímek (optický mikroskop).

Tepelným zpracováním můžeme změnit tvar precipitátů a tím i mechanické vlastnosti oceli v širokém intervalu hodnot. Přidáme – li i možnost dislokačního zpevnění, případně chemické úpravy (probubláváním tekuté oceli vzduchem nebo kyslíkem, můžeme v ní snížit obsah uhlíku), spolu s jinými druhy příměsí (Ni, V, Cr, Si apod.), dostáváme skutečně velmi širokou škálu různých konstrukčních ocelí s možností „ušítí“ vlastností na míru.

## **5.5. Zpevnění pomocí hranic zrn.**

Hranice zrn (odstavec 4.3.2) jsou jako plošné poruchy složeny buď z dislokací (maloúhlové hranice), nebo z tenké téměř amorfni vrstvičky (velkoúhlové hranice) a již na první pohled jsou značnou překážkou pro pohyb dislokací. Deformace polykrystalů s velkým zrnem je obvykle dána hlavně deformací uvnitř zrn na rozdíl od deformace polykrystalů s malými zrny, která se téměř nedeformují a „kloužou“ po sobě (tzv. *pokluz po hranicích zrn*).

Velikost a tvar zrn se během deformování mění, přičemž se tvar jednoho zrna přizpůsobuje tvaru zrn sousedních (nevznikají mezi nimi kavity – prázdná místa). V tom případě hraje velký význam mechanismus difúze atomů, silně ovlivňovaný teplotou deformovaného materiálu.

Poznámka: Ve fyzice pevných látek se nízkou (resp. vysokou) teplotou rozumí teplota nižší, (resp. vyšší), než je polovina teploty tání  $T_M$  ( v  $K$ ) dané látky.



## **5.6. Kontrolní otázky**

- 5.6.1. Detailně popište pohyb hranové a šroubové dislokace.
- 5.6.2. Co se stane, protne – li se například hranová dislokace s dislokací šroubovou ?
- 5.6.3. Uveďte dva hlavní mechanismy vzniku dislokací v krystalických pevných látkách.
- 5.6.4. Popište činnost Frankova – Reedova zdroje dislokací.
- 5.6.5. Objasněte pojem *deformační zpevnění*, uveďte způsoby jeho praktické realizace a využití v praxi.
- 5.6.6. Objasněte pojem *příměsové zpevnění*, uveďte způsoby jeho praktické realizace a využití v praxi.
- 5.6.7. Objasněte pojem *precipitační zpevnění*, uveďte způsoby jeho praktické realizace a využití v praxi.
- 5.6.8. Objasněte vliv hranic zrn na zpevnění materiálu. Uveďte praktické využití.



## 6. Mechanické vlastnosti kovů.



Cíl:

Kovy jsou již po několika stoletích nejvýznamnějšími konstrukčními materiály ve strojírenství a stavebnictví. Proto budeme věnovat tuto kapitolu právě mechanickým vlastnostem kovů a slitin. Jak uvidíme později, dají se některé závěry, týkající se kovů aplikovat i na jiné materiály.



### 6.1. Pružné (elastické) vlastnosti kovů.

Jestliže namáhané těleso zaujme po odtižení svůj původní tvar, potom říkáme, že jsme nepřekročili oblast pružné (nebo též elastické) deformace. Tuto větu můžeme pokládat za kvalitativní definici pojmu *pružná deformace*. Z technického hlediska lze pružnou deformaci uskutečnit několika způsoby:

- deformací v tahu (tlaku),
- deformací ve smyku,
- všestrannou deformací (v tlaku),
- deformací v torzi – ta se dá převést na deformaci ve smyku.

Dále si stručně všimneme některých z nich.

#### 6.1.1. Deformace v tahu, nebo tlaku.

Působí – li na těleso (pro názornost těleso protáhlého tvaru délky  $l_0$  – Obr.6.1a) ve směru podélné osy síla  $F$ , dojde k protažení tělesa o délku  $\Delta l = l - l_0$ . Pro malá prodloužení potom pozorujeme (stejně jako v 17. století anglický fyzik Robert Hooke) přímou úměrnost mezi silou a prodloužením. Abychom vyloučili vliv geometrických parametrů namáhaného vzorku (kromě původní délky  $l_0$  též původní průřez vzorku  $S_0$ ), je vhodné zavést do zmíněné úměry bezrozměrnou veličinu

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6.1)$$

tzv. *relativní prodloužení* a veličinu *normálové napětí* vztahem

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (6.2)$$

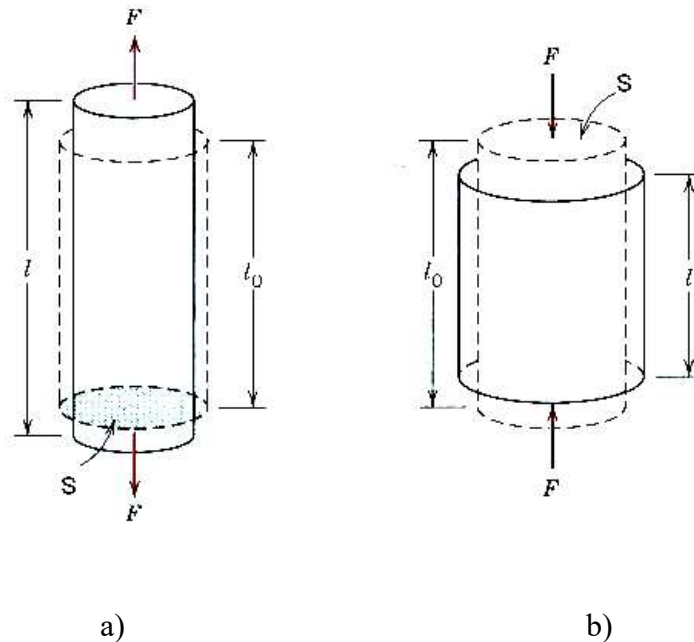
Potom lze psát Hookův zákon ve tvaru

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \frac{F}{S_0}, \quad \text{tj.} \quad \varepsilon = \frac{1}{E} \sigma \quad (6.3)$$

kde  $E$  je materiálová konstanta, tzv. *Youngův modul pružnosti v tahu*. Velikost  $E$  je pro kovy řádu  $10^{10} - 10^{11}$  Pa.

V případě deformace v tlaku je situace obdobná jako v tahu, pouze směr síly je opačný (Obr. 6.1b).

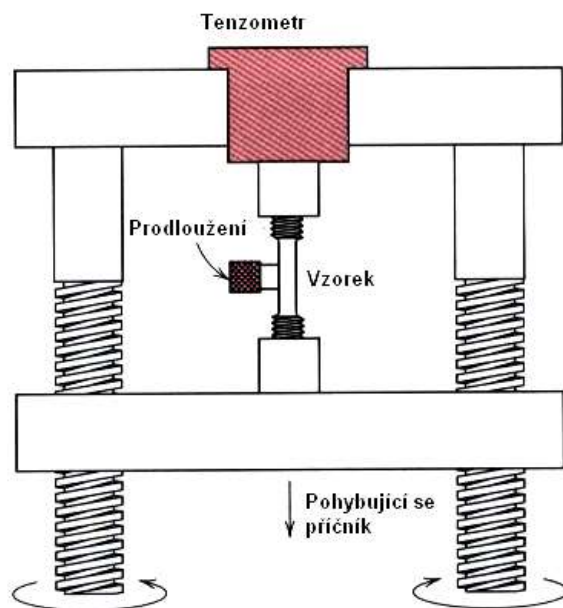
V případě krystalických materiálů jsou v důsledku jejich anizotropie veličiny  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  a  $E$  závislé na směru působení síly, jsou tzv. tenzory (veličiny, reprezentované maticemi).



Obr. 6.1. Pružná deformace v tahu a tlaku.

Z důvodu jednoduchosti budeme dále předpokládat, že se jedná o deformaci izotropního materiálu (a to je v případě polykrystalů přípustné).

Pro úplnost je třeba ještě uvést alespoň jeden ze způsobů praktického provedení elastické deformace. Je to klasický způsob využití tzv. deformačních strojů různého typu. Schéma jednoho z nich je uvedeno na Obr. 6.2. Grafickým výstupem měření na takovém stroji je křivka  $\sigma = f(\varepsilon)$ , která je pro pružnou deformaci reprezentovaná přímkou se směrnici  $E$ .



Obr.6.2. Typický deformační stroj typu Instron.

### 6.1.2. Deformace ve smyku

Schéma praktického provedení elastické deformace ve smyku je ukázáno na Obr.6.3a). Po zavedení bezrozměrné veličiny

$$\gamma = \frac{x}{a} \quad (6.4)$$

zvané *zkos* a *tečného napětí*

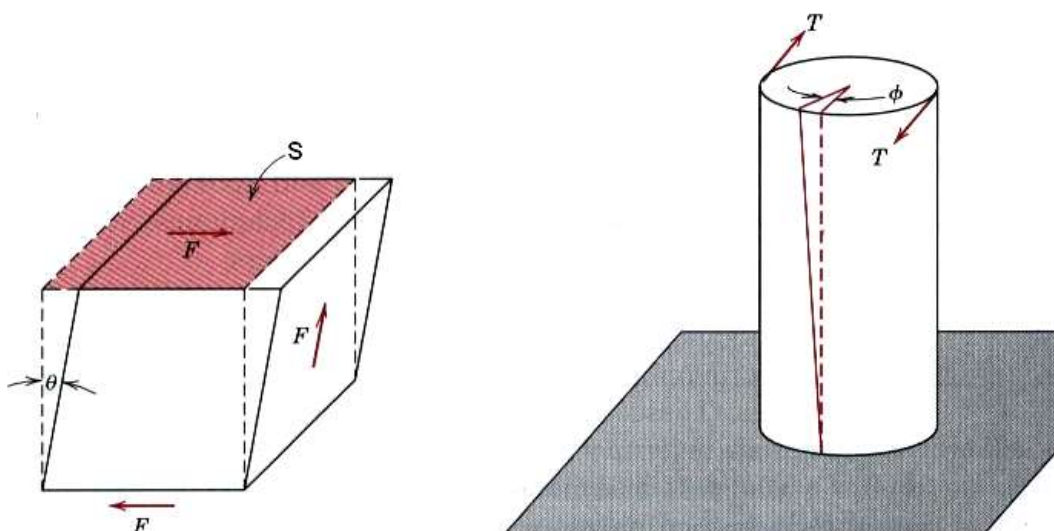
$$\tau = \frac{F}{S_0} \quad (6.5)$$

má Hookův zákon pro pružnou deformaci ve smyku tvar

$$\frac{x}{a} = \frac{1}{G} \frac{F}{S_0}, \quad \text{tj.} \quad \gamma = \frac{1}{G} \tau \quad (6.6)$$

kde  $G$  je modul pružnosti ve smyku. I v tomto případě jsou pro krystalické materiály veličiny  $\gamma$ ,  $\tau$  a  $G$  tenzory.

Na Obr.6.3b) je ukázána schematicky deformace v torzi. Z obrázku je patrné, že ji lze snadno převést na deformaci ve smyku.



Obr.6.3. Deformace ve smyku

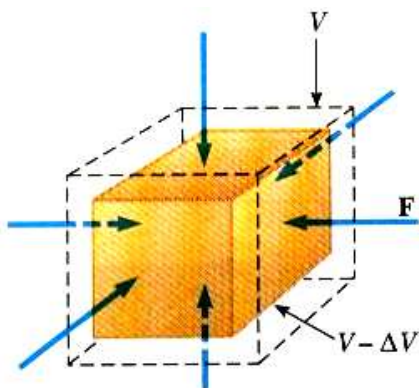
### 6.1.3. Všestranný tlak.

Působí – li na dané těleso síla  $F$  symetricky se všech stran (Obr.6.4), lze tuto deformaci převést na deformaci v tlaku a Hookův zákona napsat ve tvaru

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{1}{K} p \quad (6.7)$$

kde  $V_0$  je původní objem tělesa,  $\Delta V = V - V_0$  je jeho změna,  $p$  je všestranný tlak a  $K$  je modul objemové pružnosti.

S působením všestranného tlaku se setkáme například u těles, nacházejících se pod vodní hladinou (ponorky, batyskafy).



Obr.6.4. Všestranný tlak.

Znalost pružných vlastností materiálů má velký význam ve strojírenství a stavebnictví (konstruktéři musí dbát toho, aby nepřekročili oblast pružné deformace). V Tab.6.1. jsou uvedeny konstanty  $E, G$  a  $K$  pro některé polykrystalické kovy a nekovové materiály.

Tab.6.1.

Látka	$E \cdot 10^{-10} \text{Pa}$	$G \cdot 10^{-10} \text{Pa}$	$K \cdot 10^{-10} \text{Pa}$	Látka	$E \cdot 10^{-10} \text{Pa}$	$G \cdot 10^{-10} \text{Pa}$	$K \cdot 10^{-10} \text{Pa}$
Al	7,07	2,64	7,3	dural	7,25	2,75	7,5
Si	9,5	3,3	31,3	litina	11,0	4,4	7,3
Cu	12,3	4,55	13,8	mosaz	9,9	3,65	11,8
Pb	1,6	0,56	4,3	ocel	20,4	7,9	16,1
Pt	17,0	6,1	25,6	SiO <sub>2</sub>	7,3	3,1	3,7
Ag	7,9	2,9	10,1	kaučuk	0,00015	0,00005	0,0083
Au	7,85	2,76	16,7	polystyren	0,32	0,12	0,31
Fe $\alpha$	21,2	8,2	17,2	sklo	5 - 6	2 – 2,5	3,8 – 3,6
U	18,0	7,2	12,0	plexisklo	0,33	0,12	0,37
diamant	112,0	52,0	43,5	H <sub>2</sub> O led	0,93	0,35	0,91
bronz	9,7-10,2	3,3-3,7	11,2	NaCl	3,85	1,52	2,5

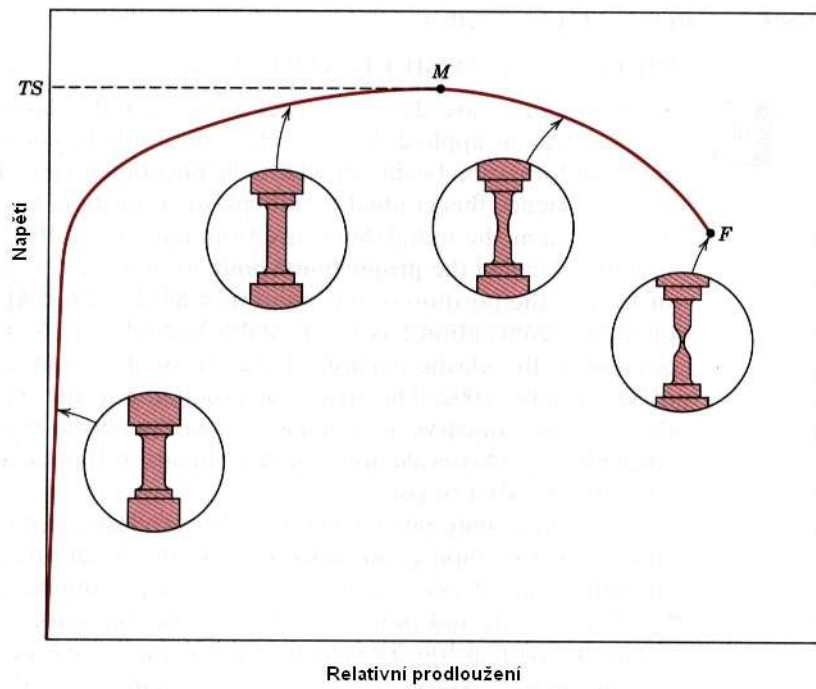
Moduly pružnosti a zejména jejich závislosti na různých parametrech (např. na teplotě) mají velký význam pro fyziku materiálů – vypovídá mnohé zejména o vazebních silách mezi atomy v pevných látkách.

Poznámka: Anelasticita.

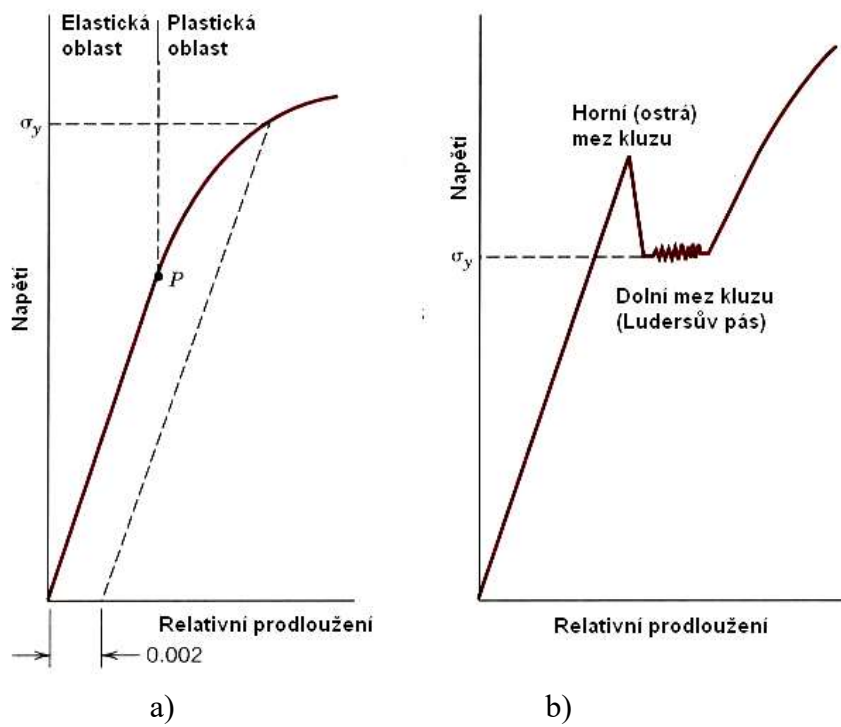
Při definování pojmu pružnost (elasticita) jsme uvedli, že po ukončení působení síly na těleso se obnoví jeho původní tvar. Tento návrat k výchozímu tvaru je velmi rychlý (daný rychlostí zvuku v materiálu tělesa). Pokud se původní tvar tělesa obnoví až po jisté delší době (vteřiny, minuty, nebo i hodiny), hovoříme o jevu *anelasticity*. U kovů je anelasticita prakticky zanedbatelná, ale u některých jiných látek, jako jsou například polymery je dobře pozorovatelná. My si jí ještě budeme věnovat v kapitole o polymerech.

## 6.2. Plastické vlastnosti kovů.

Deformujeme-li určitý vzorek například v tahu (např. v zařízení na Obr.6.2), získáme závislost  $\sigma = f(\epsilon)$ , na níž lze názorně demonstrovat jak oblast pružné deformace ( a někdy i anelasticitu), tak i oblast plastické deformace. Vidíme na ní, že počáteční přímkový úsek pružné deformace pokračuje až do přetržení oblastí plastické deformace. (Obr. 6.5). Napětí, příslušející začátku plastické deformace je technicky i z hlediska fyzikálního poznání velmi významné a nazývá se *mez kluzu* (neb *kritické skluzové napětí*). Podle tvaru diagramu pozorujeme buď tzv. *horní a dolní mez kluzu* (někdy též *ostrou mez kluzu*) – Obr.6.6b, nebo *smluvní mez kluzu*  $\sigma_y$ , Obr.6.6a). Ta udává napětí, potřebné k dosažení určité trvalé deformace, (obvykle 0,2% měřené délky) a uvádí se v označení příslušné meze, např.  $\sigma_{0,2}$ .

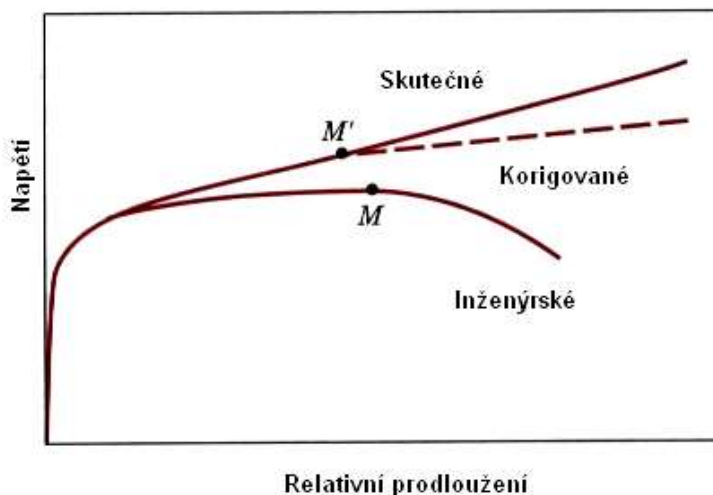


Obr.6.5. Typická křivka  $\sigma = f(\varepsilon)$ , získaná pomocí stroje na Obr.6.2.



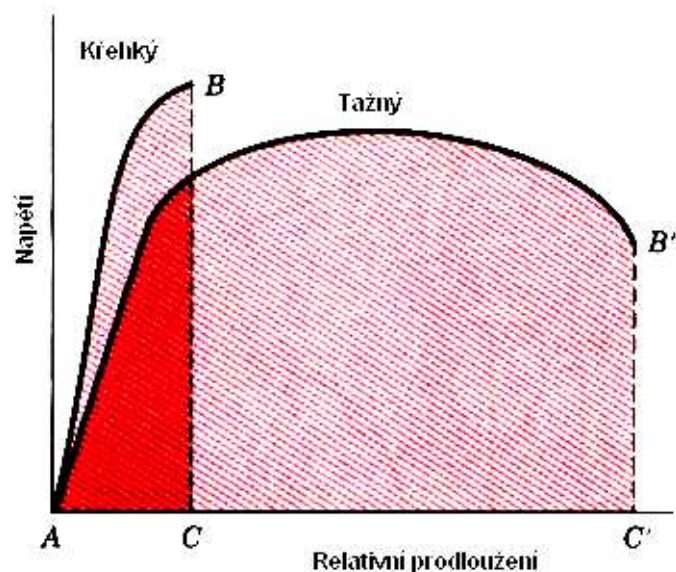
Obr.6.6 a,b. K určení meze kluzu.

Ze schematického obrázku (Obr.6.5) vidíme, že deformování některých materiálů (zejména těch houževnatějších) může být značně nehomogenní (v jistém místě vzorku se vytvoří zúžení (krček) a v tomto místě dojde nakonec k přetržení vzorku. Protože však napětí kvůli jednoduchosti stále počítáme jako poměr síly a původního průřezu materiálu, klesá křivka  $\sigma = f(\varepsilon)$  s rostoucím  $\varepsilon$  (i když by to byl paradoxní výsledek – vzorek by se prodlužoval i v případě, že napětí klesá). Proto je fyzikálně správnější, ale experimentálně obtížnější počítat napětí jako sílu, působící na okamžitý (zmenšující se) průřez – viz křivka na Obr. 6.7.

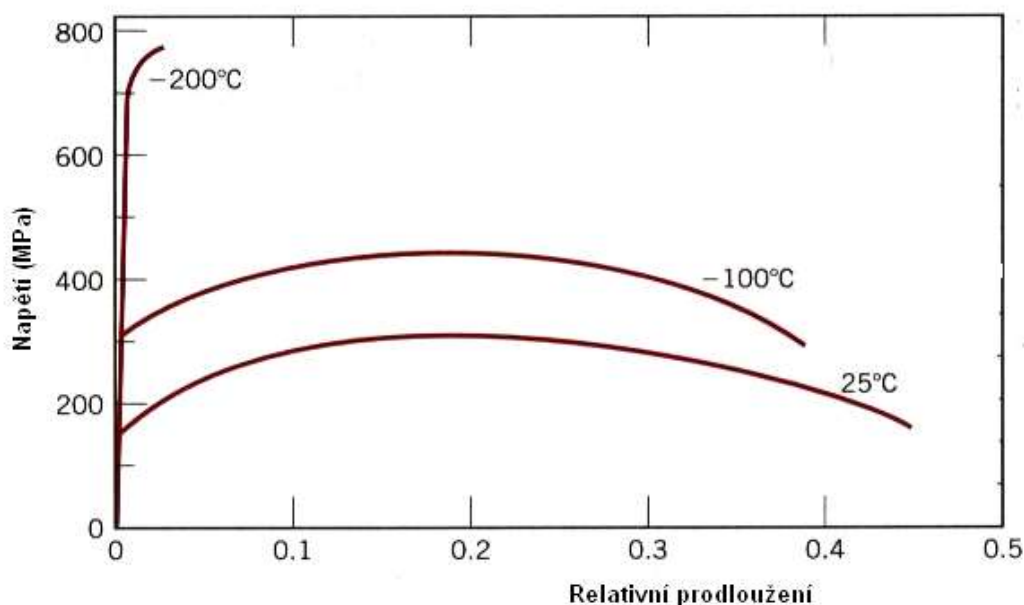


Obr.6.7. Oprava křivky  $\sigma = f(\varepsilon)$  na skutečný průřez.

Důležitou vlastností materiálů je jejich *tažnost*. Je to velikost plastické deformace, kterou je třeba dodat materiálu, než dojde k lomu. Materiály, u nichž je tato veličina malá, nazýváme křehkými, na rozdíl od materiálů tažných, kde je plastická deformace do lomu velká. (Obr.6.8). Z tohoto obrázku vidíme, že tažnost lze vyjádřit jako veličinu, úměrnou ploše pod příslušnými křivkami  $\sigma - \varepsilon$ . Z Obr. 6.9 plyne, že tažnost je výraznou funkcí teploty (v tomto případě se jedná o ocel).



Obr.6.8. Křivka  $\sigma = f(\varepsilon)$  pro křehké a tažné materiály.



Obr.6.9. Vliv teploty na tvar křivky  $\sigma = f(\varepsilon)$ .

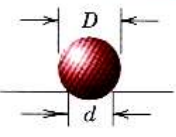
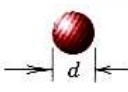
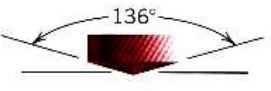
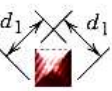
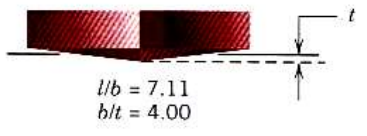

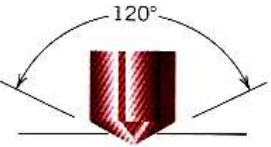


### 6.3. Tvrдость materiálu.

Tvrđost je další veličinou, charakterizující mechanické vlastnosti materiálů. Výhodou této veličiny je snadný způsob jejího měření a skutečnost, že se jedná o měření nedestruktivní. Nevýhodou může být poměrně složitá fyzikální interpretace získaných výsledků.

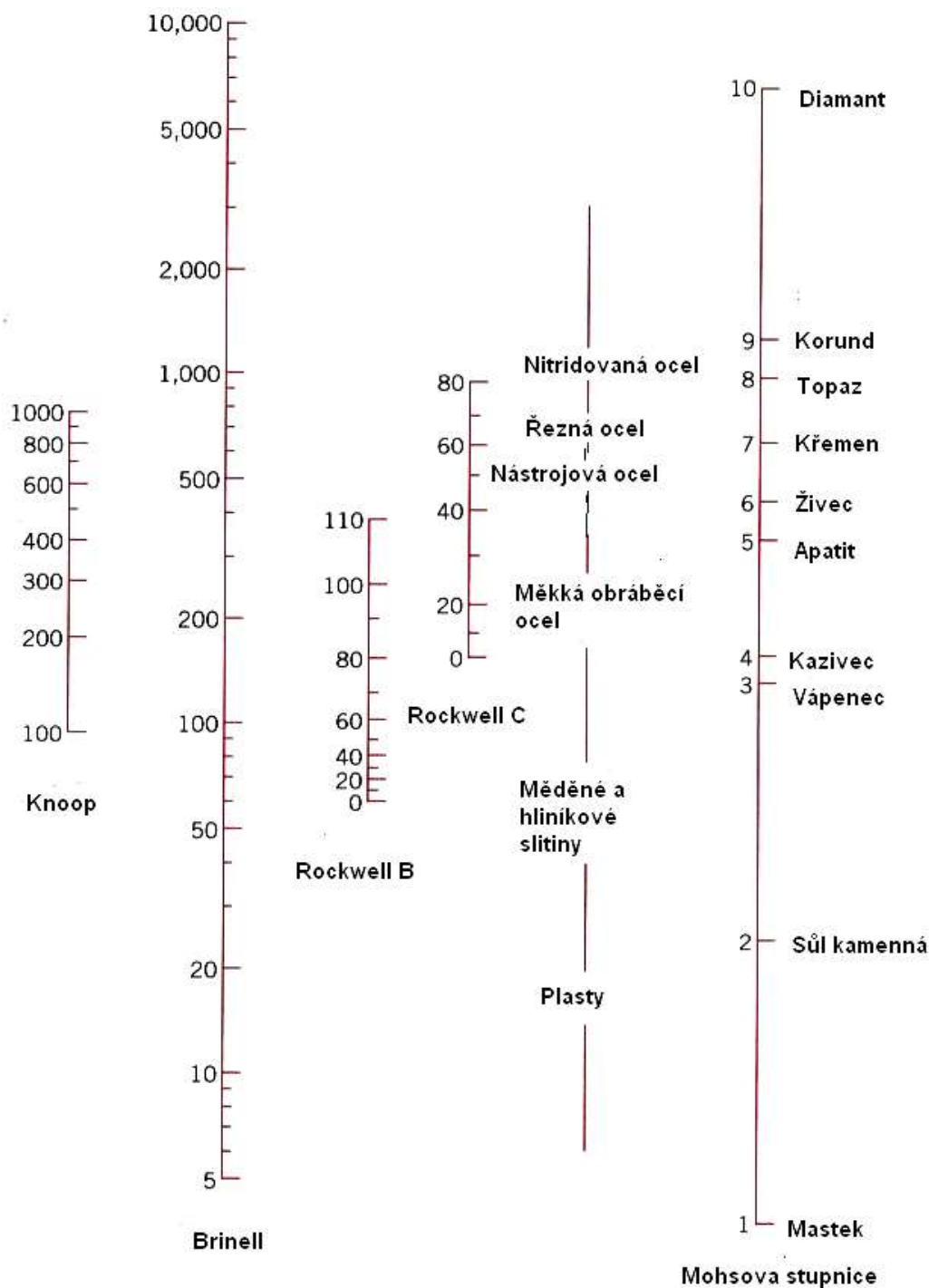
Jednou z prvních metod kvalitativního měření tvrđosti materiálů je metoda užívaná zejména v mineralogii. Je založena na tzv. *Mohsově* stupnici tvrđosti, podle níž vždy následující materiál je schopen udělat vryp do materiálu předcházejícího.



Mohsova stupnice: *mastek, sůl kamenná, vápenec, kazivec, apatit, živec, křemen, topaz, korund, diamant.*

Zkouška podle	Indentor	Tvar vtisku	Vztah pro výpočet tvrdosti
Brinella			$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickerse			$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoopa			$HK = 14.2P/l^2$
Rockwella		 	

Obr.6.10. Některé metody měření tvrdosti materiálů.



Obr. 6.11. Porovnání různých stupnic tvrdosti.

Zkoušky tvrdosti, užívané zejména v metalurgii a strojírenství, mají společný princip. Tvrdost je podle nich definována jako „odpor materiálu proti vnikání jiného, tvrdšího tělesa definovaného tvaru“. Podle tvaru tohoto tělesa (tzv. *indentoru*) dělíme zkoušky tvrdosti na (Obr.6.10):

- Tvrdost podle *Brinella* – vtlačována je malá kulička z tvrdokovu, měřeno je zatížení, působící na kuličku a plocha vtisku (kulový vrchlík). Tvrdost HB je potom rovna poměru těchto změřených veličin.
- Tvrdost podle *Vickerse* - vtlačován je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^{\circ}$ . Měřeno je opět zatížení a plocha vtisku, tvrdost HV je rovna jejich poměru.

- c) Tvrdost podle *Berkoviche* je analogická tvrdosti HV, pouze indentor má tvar trojbokého diamantového jehlanu. Metoda má výhodu experimentálního rázu – trojboký jehlan lze vybrousit do téměř ideální špičky. Ta hraje roli zejména při malých velikostech vtisku.
- d) Tvrdost podle *Knoop*a je opět podobná tvrdosti podle Vickerse, diamantový indentor má takový tvar, že vtisk má dvě různé diagonály, jednu kratší a druhou delší. Metoda je vhodná k měření tvrdosti tenkých vrstev a křehkých materiálů ( i malé zatížení způsobí vtisk o poměrně velké ploše).
- e) Tvrdost podle *Rockwella* – vtiskována je buď tvrdá kulička, nebo diamantový kužel. Měřeno je zatížení a hloubka vtisku, z níž se dá snadno vypočítat plocha vtisku. Tato metoda je vhodná pro drsnější povrchy, neboť k měření nepotřebujeme optický mikroskop.

Hodnoty tvrdosti, získané jednotlivými metodami, lze přibližně porovnat mezi sebou i s Mohsovou stupnicí tvrdosti. (Obr.6.11). Ukazuje se též, že existuje i jednoduchý empirický vztah mezi tvrdostí a mezi kluzu:

$$\sigma_y \text{ (MPa)} = 3,45 \cdot HB \quad (6.8)$$

V posledním desetiletí pozorujeme značnou renesanci metod měření tvrdosti (jejichž stáří přesahuje století). Je to zejména proto, že potřebujeme znát mechanické vlastnosti tenkých vrstev i malých objemů pevných látek. Proto byly zdokonaleny metody měření mikrotvrdosti a ultramikrotvrdosti (dělení podle velikosti zatížení).

## ? 6.4. Kontrolní otázky

- 6.4.1. Proč je výhodné používat při měření a výpočtech pružné deformace pevných látek veličin  $\varepsilon$  a  $\sigma$ , resp.  $\gamma$  a  $\tau$  ?
- 6.4.2. Jaký fyzikální význam mají veličiny E a G ?
- 6.4.3. Popište činnost deformačního stroje typu Instron.
- 6.4.4. Kde se v praxi setkáme s působením všestranného tlaku ?
- 6.4.5. Nakreslete typickou křivku  $\sigma - \varepsilon$  a pojmenujte a charakterizujte jednotlivé její části a významné body.
- 6.4.6. Vyjmenujte Mohsovu stupnici tvrdosti.
- 6.4.7. Vyjmenujte základní metody měření tvrdosti materiálů a uveďte jejich základní charakteristiky.