

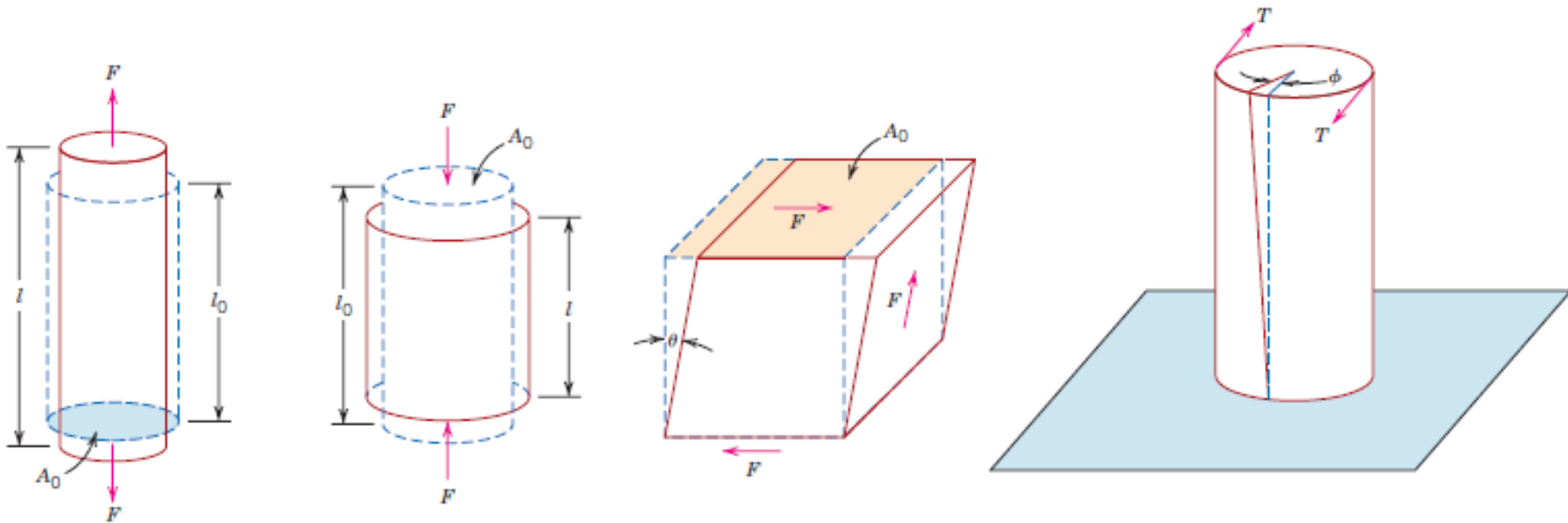
Chemie a fyzika pevných látek – přednáška 14

MECHANICKÉ VLASTNOSTI PEVNÝCH LÁTEK

Mechanické vlastnosti pevných látek – reakce na mechanické zatěžování v závislosti na poměru vnějších deformačních a vnitřních vazebných sil.

namáhání v tahu, tlaku, smyku, zkrutu, ohybu, ... → působící síla pevnou látku deformuje

napětí = síla / plocha [N m⁻² = Pa]

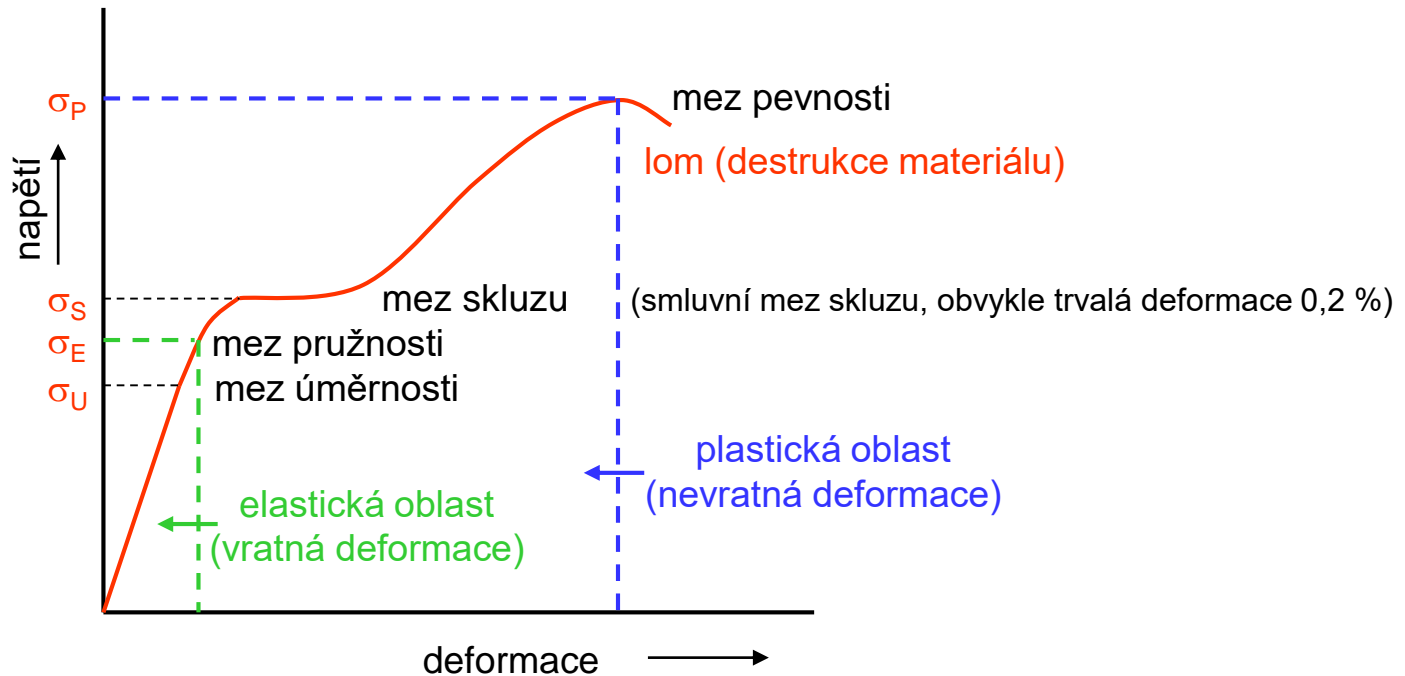


namáhání v tlaku nebo v tahu – síla působí kolmo na danou plochu (tahové/tlakové napětí σ)

všestranné tlakové namáhání (síla působí rovnoměrně ze všech stran)

namáhání ve smyku – síla působí na danou rovinu podélně (smykové napětí τ)

Závislost deformace pevné látky na napětí



Základní mechanické vlastnosti:

pružnost: schopnost vratné deformace působením vnějších sil

tvárnost: schopnost nevratné deformace působením vnějších sil (neschopnost plastické deformace = křehkost)

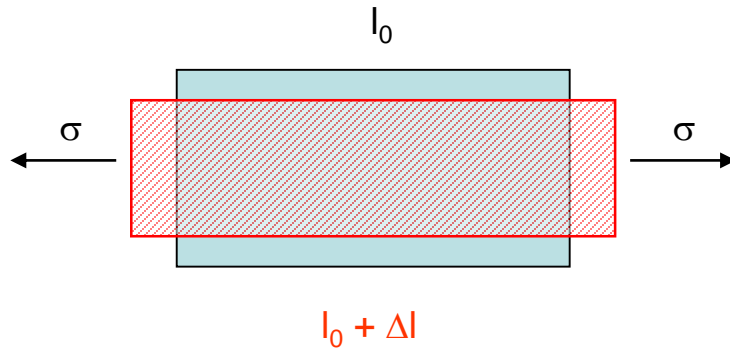
pevnost: odolnost vůči trvalému porušení celistvosti – napětí nutné k porušení

houževnatost: odolnost vůči trvalému porušení celistvosti – vykonaná práce nutná pro porušení

Elastické chování

izotropní pružné těleso (polykrystalické kompaktní materiály, kovy, plasty, apod.), tahové napětí vyvolá deformaci

$$\sigma = F/A \rightarrow \varepsilon = (l - l_0) = \Delta l/l_0$$



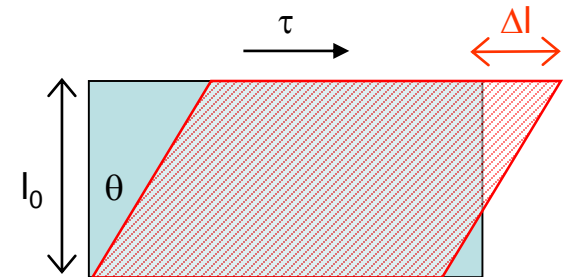
do meze úměrnosti σ_U platí **Hookův zákon**

$$\sigma = E\varepsilon$$

(E – Youngův modul pružnosti v tahu, hodnoty řádově v 10^{10} N m⁻²)

podélně působící síla (smykové napětí) $\tau = F'/A$
→ smyková deformace $\gamma = \frac{\Delta l}{l_0} = \tan \theta$, $\tau = G\gamma$

(G – Youngův modul pružnosti ve smyku)



$$\frac{E}{G} = 2(\nu + 1) \quad \nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right|$$

Poissonovo číslo ($\varepsilon_y, \varepsilon_x$ – relativní deformace ve směru kolmém resp. rovnoběžném na směr namáhání)
pro většinu materiálů $\nu = 0$ až $0,5$

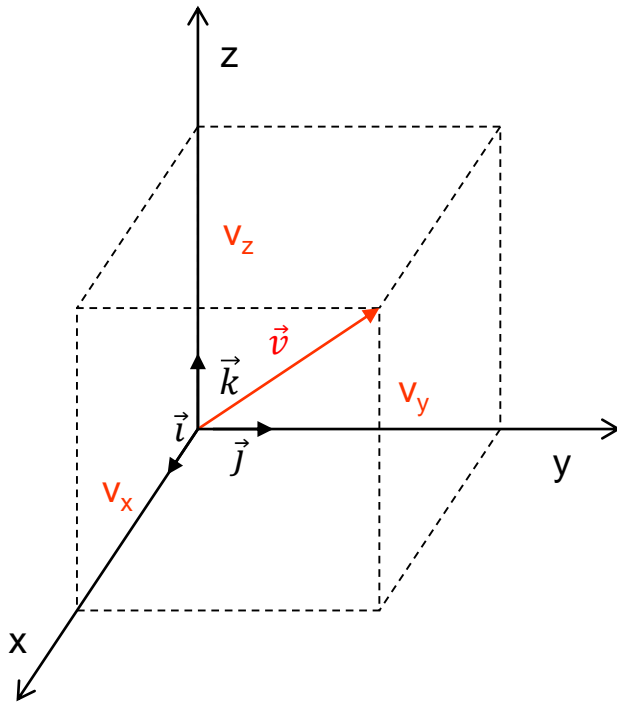
Poznámka: Tenzory

skalár – veličina určená jedním číselným údajem → tenzor 0. řádu

vektor – veličina určená velikostí a směrem → tenzor 1. řádu

v pravouhlé soustavě souřadnic lze vektor \vec{v} rozložit na složky v_x, v_y, v_z

$$\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} \quad (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k} - \text{jednotkové vektory v osách } x, y, z)$$



velikost vektoru \vec{v}

$$v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

obecný vztah mezi dvěma vektory

vektorová veličina definovaná složkami (v_1, v_2, v_3) je funkcí jiné vektorové veličiny (u_1, u_2, u_3) , lze ji vyjádřit lineární kombinací složek u_1, u_2 a u_3

$$\begin{aligned}v_1 &= T_{11}u_1 + T_{12}u_2 + T_{13}u_3 \\v_2 &= T_{21}u_1 + T_{22}u_2 + T_{23}u_3 \\v_3 &= T_{31}u_1 + T_{32}u_2 + T_{33}u_3 \\v_i &= T_{ij}u_j\end{aligned}\quad T_{ij} = \begin{vmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{vmatrix}$$

T_{ij} – tenzor 2. řádu, 9 složek, každá má určitý geometrický a fyzikální smysl
(příklady tenzoru 2. řádu – povrchové napětí kapaliny, koeficient tepelné vodivosti)

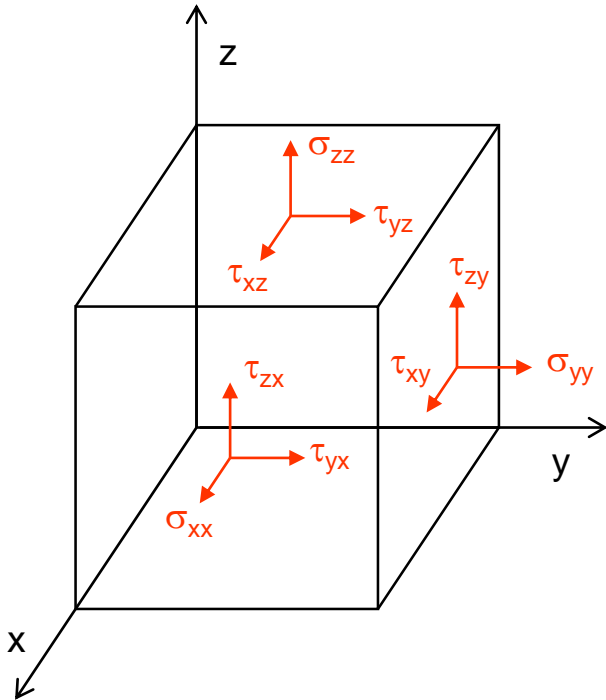
vztah mezi vektorem a tenzorem 2. řádu $v_i = T_{ijk}Q_{jk} \rightarrow$ tenzor 3. řádu T_{ijk}
(27 složek)

vztah mezi vektorem a tenzorem 3. řádu nebo mezi dvěma tenzory 2. řádu \rightarrow tenzor 4. řádu,
atd.

elastické moduly – tenzory 4. řádu

Elastická deformace anizotropního materiálu

anizotropní prostředí (krystal) – mechanické napětí i deformace jsou tenzory 2. řádu (síla působí na plochu o určité orientaci, vektor deformace se vztahuje k orientované ploše)
obecně lze popsat 36 elastickými koeficienty



na krystal lze působit 9 nezávislými napětími (složky tenzoru 2. řádu, popisují buď tahové nebo smykové napětí)

σ_{xx} tahové napětí ve směru osy x v ploše kolmé na osu x

τ_{yx} smykové napětí ve směru osy y v ploše kolmé na osu x

τ_{zx} smykové napětí ve směru osy z v ploše kolmé k ose x

atd.

tenzor mechanického napětí T_{ij} je symetrický, platí

$$\tau_{yx} = \tau_{xy}, \tau_{yz} = \tau_{zy} \text{ a } \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

→ stav napjatosti anizotropního tělesa určuje 6 nezávislých napětí

$$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{yz}, \tau_{xz} \text{ a } \tau_{xy}$$

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$$

deformace pravoúhlého souřadného systému v krystalu

polohový vektor $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k} \rightarrow \vec{r}' = x\vec{x}' + y\vec{y}' + z\vec{z}'$

změna polohy každého bodu po deformaci: $\vec{R} = \vec{r}' - \vec{r} = x(\vec{x}' - \vec{i}) + y(\vec{y}' - \vec{j}) + z(\vec{z}' - \vec{k})$

délka i úhly mezi vektory \vec{i} , \vec{j} a \vec{k} se změní, změnu polohy lze popsat jako funkci \vec{r}

$$\vec{R} = (xe_{xx} + ye_{yx} + ze_{zx})\vec{i} + (xe_{xy} + ye_{yy} + ze_{zy})\vec{j} + (xe_{xz} + ye_{yz} + ze_{zz})\vec{k}$$

$$R(\vec{r}) = u(\vec{r})\vec{i} + v(\vec{r})\vec{j} + w(\vec{r})\vec{k}$$

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad e_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad e_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$e_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad e_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$e_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} \quad e_{zy} = \frac{\partial v}{\partial z} \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

→ tenzor deformace D_{ij}
(symetrický tenzor 2. řádu)

$$D_{ij} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}$$

$$\varepsilon_{xx} = e_{xx} \quad \gamma_{xy} = e_{xy} + e_{yx}$$

$$\varepsilon_{yy} = e_{yy} \quad \gamma_{xz} = e_{zx} + e_{xz}$$

$$\varepsilon_{zz} = e_{zz} \quad \gamma_{yz} = e_{yz} + e_{zy}$$

fyzikální význam složek:

ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} – změny délek souřadných os

γ_{xy} , γ_{xz} , γ_{yz} – změny úhlů mezi osami po deformaci

Hookův zákon v anizotropním prostředí

vztah mezi tenzorem napětí a tenzorem deformace

$$\mathbf{T}_{ij} = \mathbf{C}_{ijkl} \mathbf{D}_{kl}$$

C_{ijkl} – elastické moduly, symetrický tenzor 4. řádu (81 složek)

vzhledem k symetričnosti platí $C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{klij}$

→ snížení počtu složek na 36, pouze 21 nezávislých elastických modulů

(s rostoucí symetrií krystalu počet nezávislých modulů klesá)

určení elastických modulů - měření rychlosti šíření zvuku v určitých krystalografických směrech

(např. v kubických krystalech měření ve směrech [100], [110] a [111])

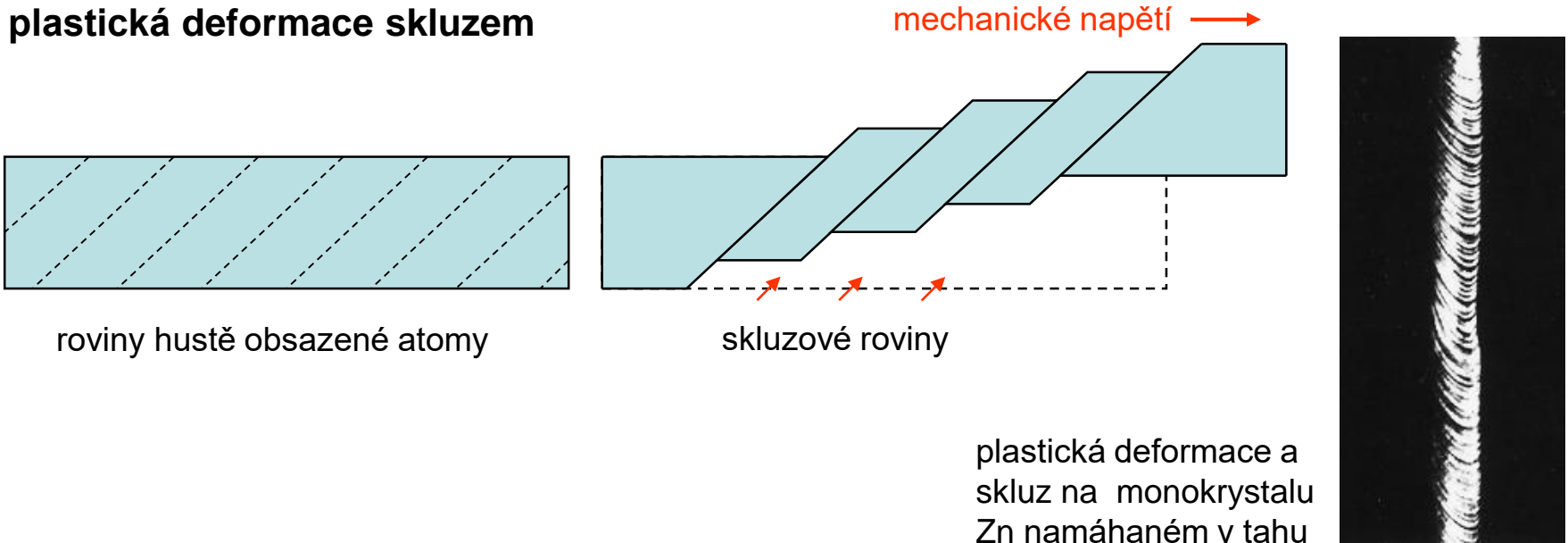
Plasticita

elastická deformace – vratná a homogenní, mechanické napětí způsobí mírné vychýlení atomů z rovnovážných poloh

plastická deformace – nehomogenní a nevratná, vychýlené atomy se přesunou do nových rovnovážných poloh (minimálně o jednu meziatomovou vzdálenost), podílí se jen malý počet atomů

smykové napětí způsobí skluz nebo dvojčatění, probíhá přednostně v určitých krystalografických směrech a rovinách (oblasti nejhustěji obsazené atomy)

plastická deformace skluzem

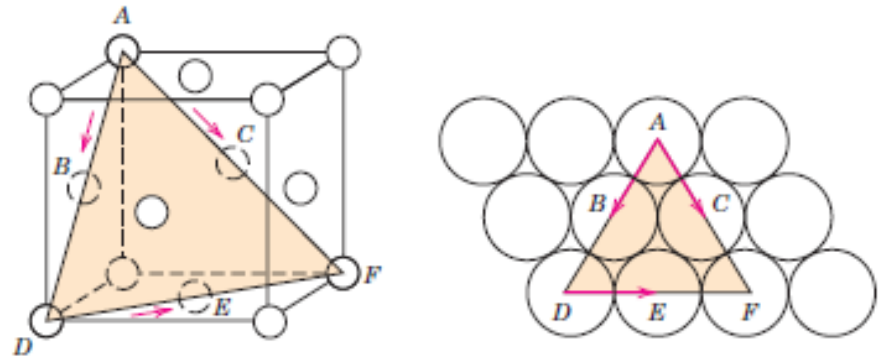


Příklad:

plošně centrovaná kubická mřížka:

atomy nejtěsněji uspořádány v rovinách typu (111), kde dochází ke skluzu ve více směrech typu [110] – kombinací vznikne 12 skluzných systémů

4 nezávislé roviny typu (111) a v každé z nich 3 nezávislé směry typu [110]



prostorově centrovaná kubická mřížka:

atomy nejtěsněji uspořádány v rovinách typu (110), kde dochází ke skluzu ve směrech typu [111] – kombinací vznikne 12 skluzných systémů

6 nezávislých rovin typu (110) a v každé z nich 2 nezávislé směry typu [111]

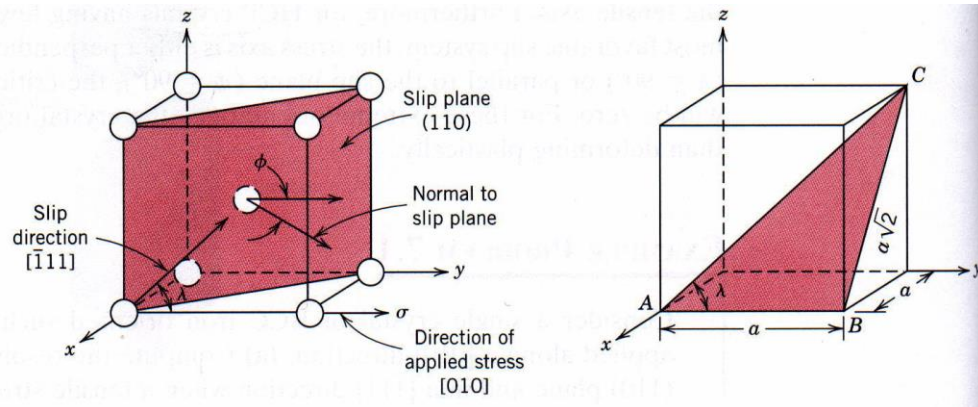
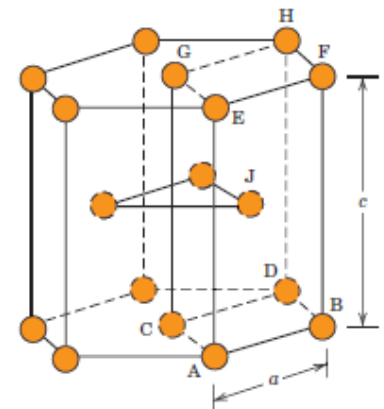


Table 7.1 Slip Systems for Face-Centered Cubic, Body-Centered Cubic, and Hexagonal Close-Packed Metals

<i>Metals</i>	<i>Slip Plane</i>	<i>Slip Direction</i>	<i>Number of Slip Systems</i>
Face-Centered Cubic			
Cu, Al, Ni, Ag, Au	{111}	$\langle \bar{1}10 \rangle$	12
Body-Centered Cubic			
α -Fe, W, Mo	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
α -Fe, W	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12
α -Fe, K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24
Hexagonal Close-Packed			
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg, Zr	{10 $\bar{1}0$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Ti, Mg	{10 $\bar{1}1$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6

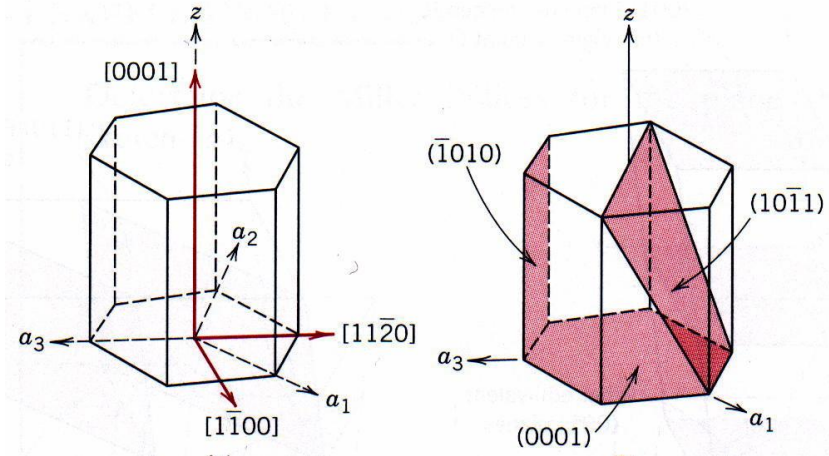
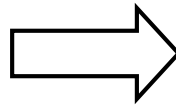
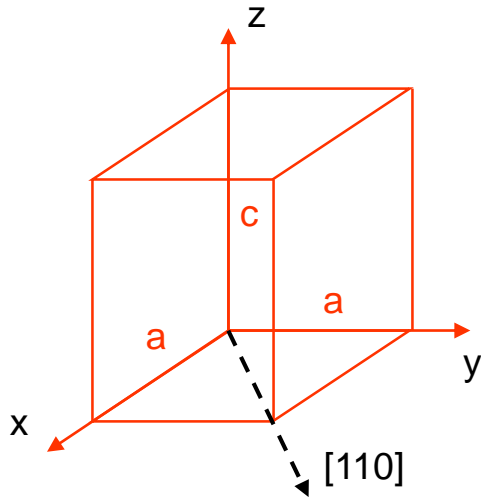
(převzato z W.D. Callister, Jr.: Materials Science and Engineering, An Introduction. 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2007)

kovy s velkým počtem skluzných systémů vykazují velkou tvárnost (plastická deformace je možná v různých směrech), kovy krystalizující v nejtěsnějším hexagonálním uspořádání jsou poměrně křehké (malý počet skluzných systémů)



Poznámka: Indexace krystalografických směrů a rovin v hexagonálních krystalech

Miller-Bravaisův systém 4 souřadných os v krystalech s hexagonální symetrií, 3 osy (a_1, a_2, a_3) leží v jedné (bazální) rovině a svírají navzájem úhel 120° , čtvrtá osa (z) je na ně kolmá; Millerovy indexy (hkl) se mění na ($hkil$), přičemž platí $h + k + i = 0$, tedy $i = -(h + k)$



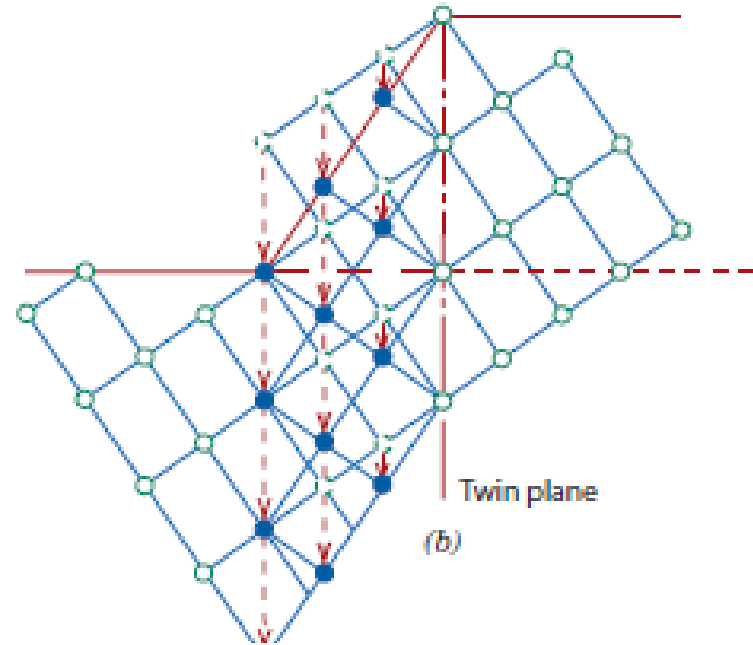
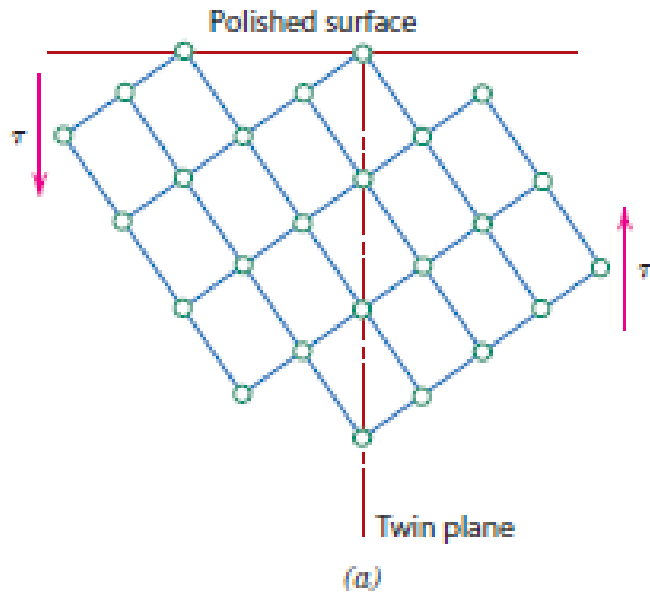
Převod krystalografického směru $[uvw]$ na $[u'v'tw']$ v systému se 4 indexy:

$$u' = \frac{n}{3}(2u - v) \quad v' = \frac{n}{3}(2v - u) \quad t = -(u' + v') \quad w' = nw$$

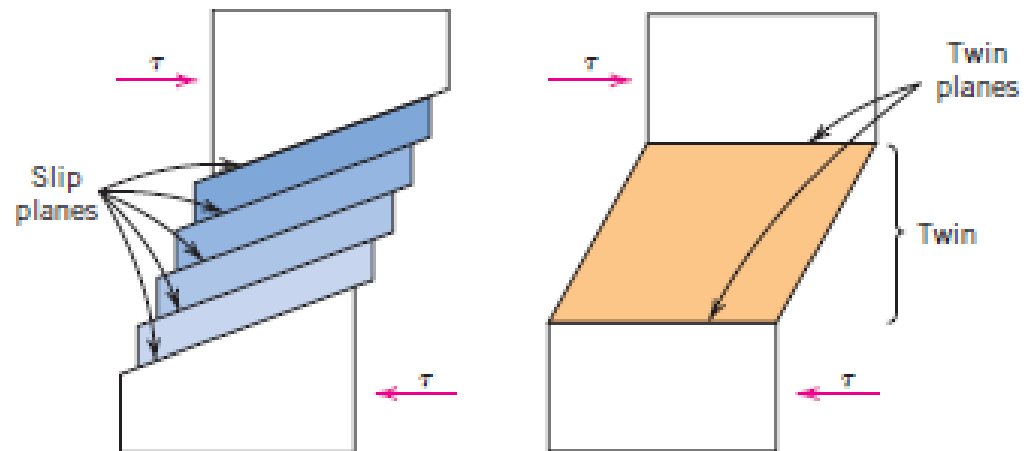
(n je faktor, kterým se hodnoty u' , v' , t a w' převedou na nejmenší celá čísla)

Příklad: transformace směru $[110]$: $u = \frac{n}{3}(2 - 1) \quad v = \frac{n}{3}(2 - 1) \quad t = -(1 + 1) \quad w = n \cdot 0 \Rightarrow [11\bar{2}0]$

Plastická deformace dvojčatěním

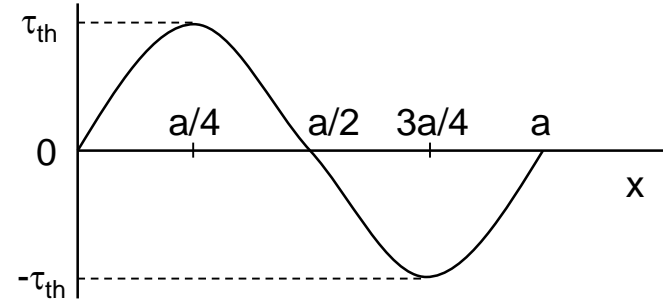
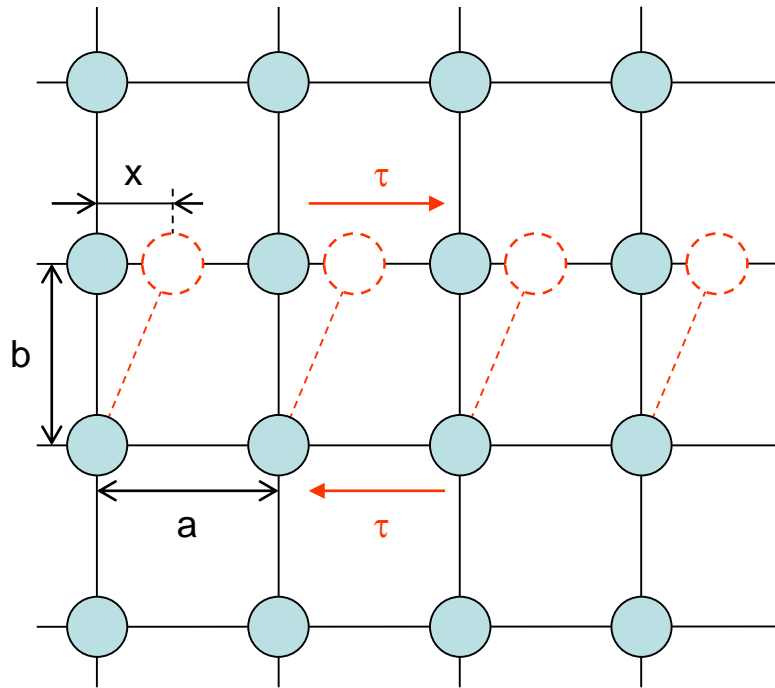


během plastické deformace se celé bloky krystalu navzájem zdánlivě posunou v rovinách skluzu nebo dvojčatění



Teoretické napětí skluzu

při dosažení τ_{th} se vrstva atomů posune o mřížkový parametr a



τ_{th} odpovídá síle při výchylce $x = a/4$ a opačně orientované síle při $x = 3a/4$ (přitahování k sousední rovnovážné poloze)

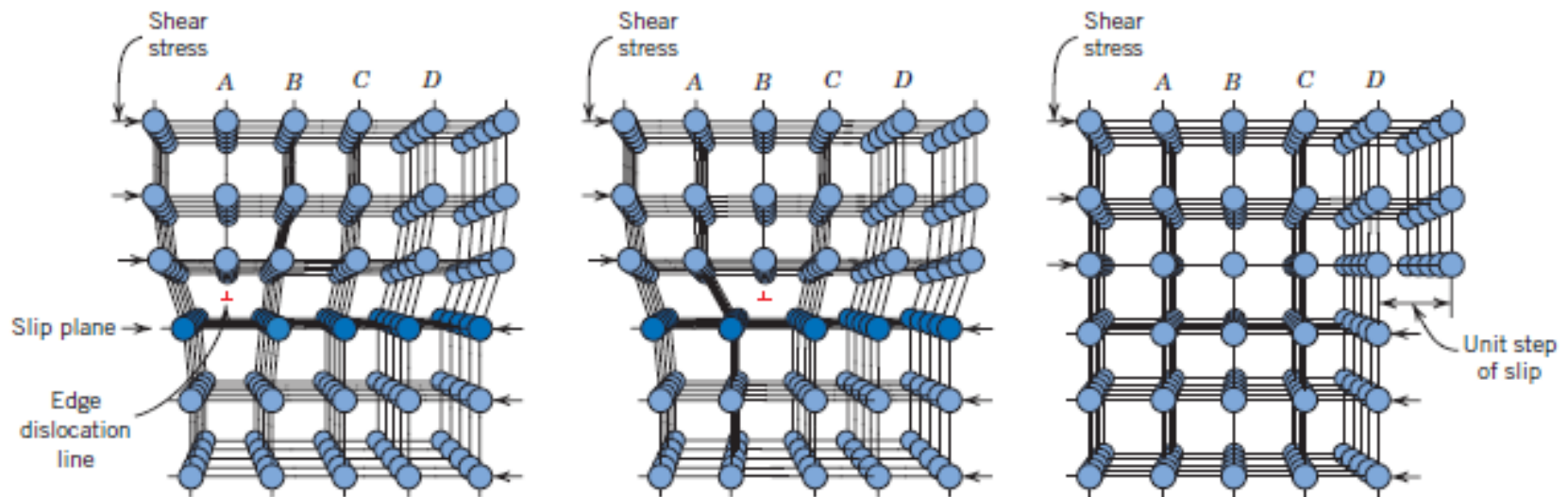
ve střední poloze mezi atomy $x = a/2$ je výslednice sil nulová

$$\tau(x) = \tau_{th} \sin \frac{2\pi x}{a} \quad \text{pro } x \ll a \text{ (malé deformace) lze upravit na } \tau(x) = \tau_{th} \frac{2\pi x}{a}$$

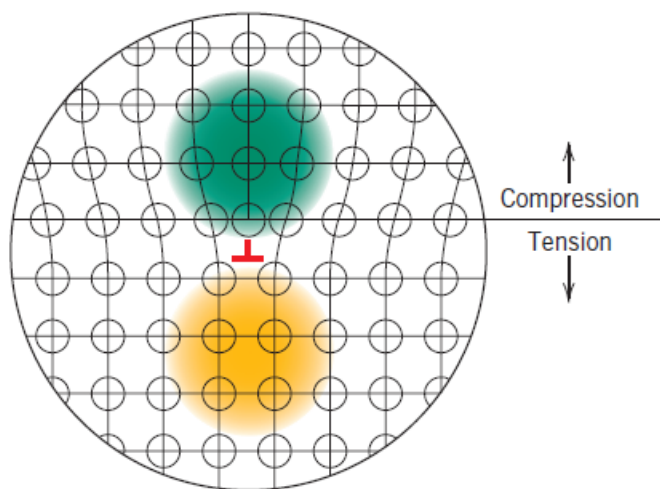
pro malé deformace platí Hookův zákon $\tau(x) = G \frac{x}{b} \rightarrow \tau_{th} = \frac{G a}{2\pi b}$

pro kovy s kubickou mřížkou $a = b$, $G \sim 10^{10} \text{ N m}^{-2} \rightarrow \tau_{th} \sim 10^9 \text{ N m}^{-2}$, skutečné hodnoty skluzového napětí jsou mnohem nižší ($10^7 - 10^8 \text{ N m}^{-2}$)

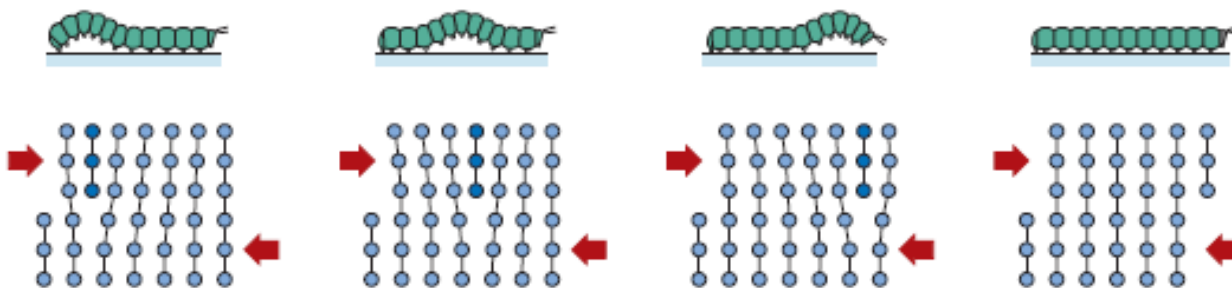
nutno uvažovat reálný krystal (pohyb dislokací a jejich množení v důsledku mechanického napětí)



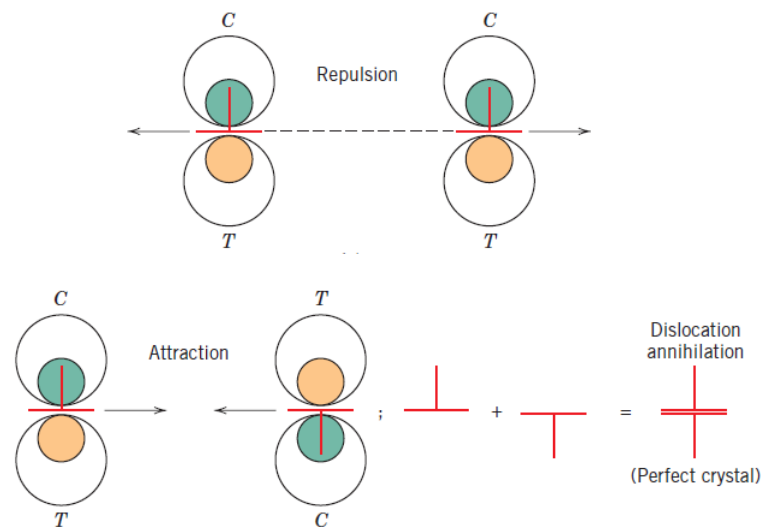
změna uspořádání atomů při průběhu hranové dislokace krystalem \rightarrow na povrchu se vytvoří stupeň o velikosti odpovídající Burgersovu vektoru \vec{b}



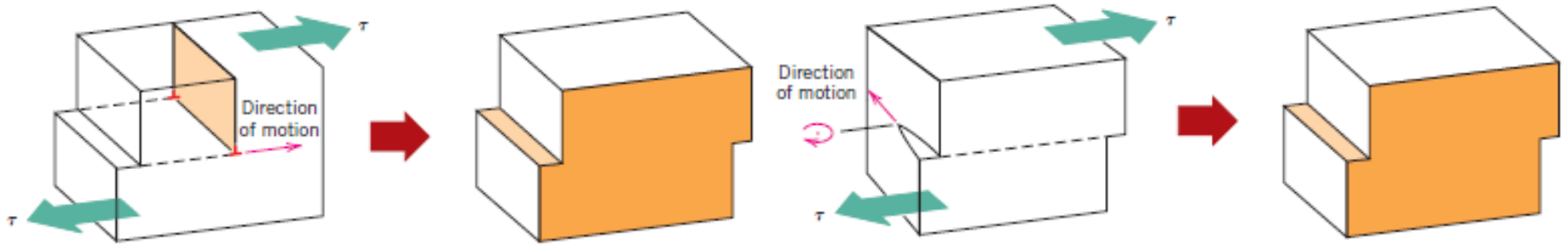
deformace pravidelně uspořádané mřížky v blízkosti dislokační čáry
 → na okolní atomy působí tlaková, tahová a smyková napětí



pro pohyb dislokace krystalem je potřeba mnohem menší napětí než pro posun vrstvy atomů jako celku



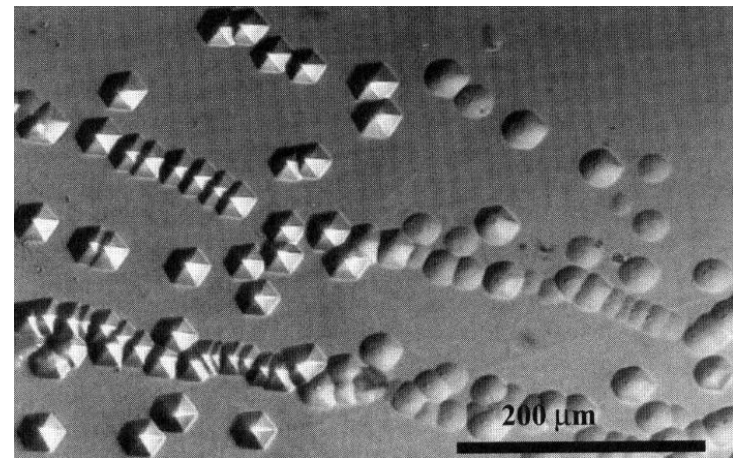
souhlasně orientované hranové dislokace ležící ve stejné skluzové rovině se odpuzují
 opačně orientované dislokace se přitahují, při setkání dojde k jejich anihilaci



vytvoření stupně na povrchu krystalu při průchodu hranové a šroubové dislokace

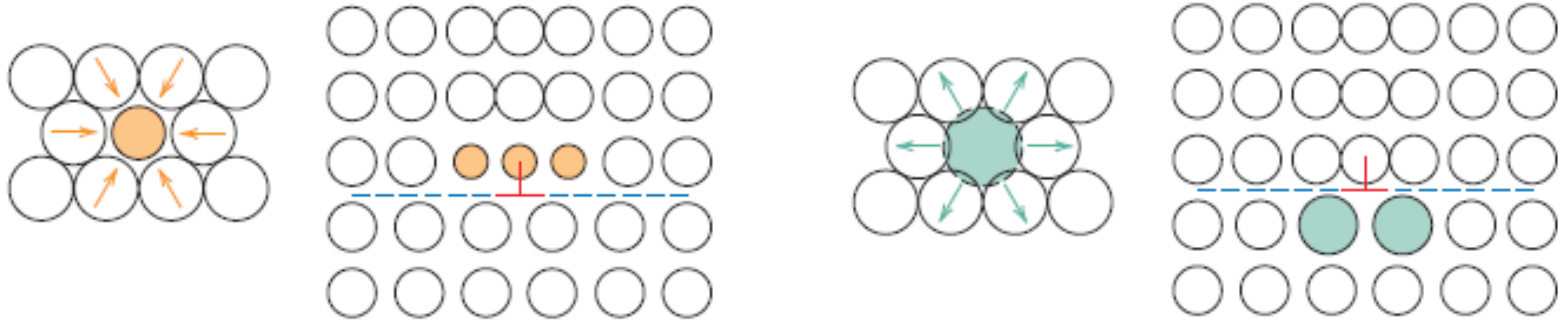
výchozy dislokací na povrchu plasticky deformovaných krystalů jsou příliš vysoké ve srovnání s velikostí Burgersova vektoru (odpovídají $\sim 10^4$ průchodů dislokací skluzovou rovinou)

→ v krystalu musí existovat zdroj dislokací během skluzu



výchozy hranových dislokací na povrchu krystalu SiC

dislokační čáry procházejí oblastmi, kde je omezený nebo znemožněný jejich pohyb, např. kvůli přítomnosti cizích atomů (příměsi, nečistoty)



substituční atomy odlišné velikosti vyvolají v mřížce tahová a tlaková napětí, mohou být částečně kompenzována interakcemi s dislokacemi → omezení pohybu dislokací krystalem

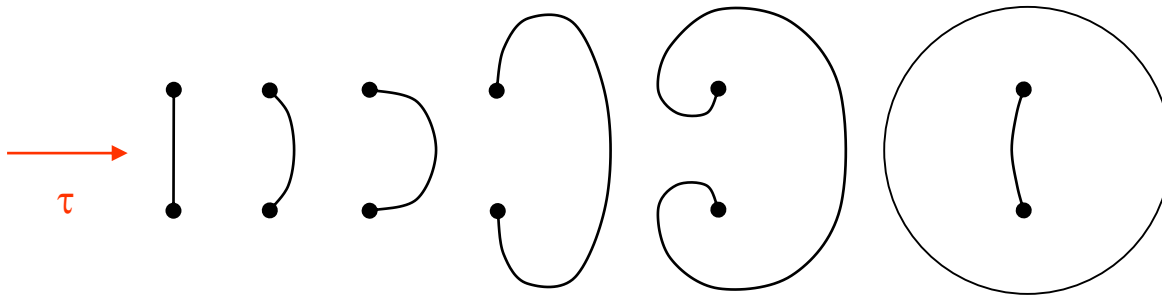
→ další pohyb dislokace je možný až po zvýšení deformačního napětí, vzrůstá odpor vůči skluzu (zpevnění materiálu)

nebo

→ zakotvení dislokace v daném místě, generování dalších dislokací ve skluzové rovině (vytvoření zdroje dislokací)

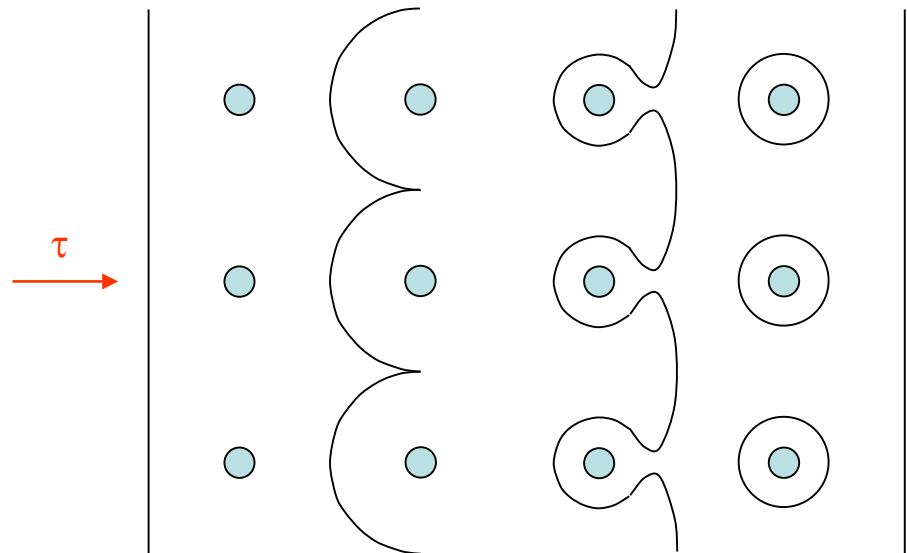
Frankův-Readův zdroj dislokací

napětí ve skluzové rovině způsobí postupné zakřivení nepohyblivé dislokační čáry zakotvené ve dvou bodech, poloměr zakřivení je maximální v polovině vzdálenosti mezi kotvícími body
→ sousední oblouky se dotknou a vznikne uzavřená dislokační smyčka (dále se zvětšuje), proces se opakuje (nová dislokační čára mezi kotvícími body)



Köhlerův-Orovanův mechanismus tvorby nových dislokací

průchod dislokace přes částice příměsí ve skluzné rovině → ohyb a postupné uzavření dislokační křivky kolem každé částice, dislokace dále postupuje v původním směru



napětí potřebné k uvedení dislokace do pohybu (Peierlsovo-Nabarrovo napětí)

$$\tau_{PN} = G \exp\left(-\frac{2\pi W}{b}\right) \quad W = \frac{a}{1-\nu} \quad (\text{šířka dislokace})$$

(G – Youngův modul pružnosti, b – meziatomová vzdálenost, a – mezivrstevná vzdálenost, ν - Poissonovo číslo)

$\tau_{PN} \sim 10^2 \text{ N m}^{-2}$, příliš malá hodnota, počítáno pro strukturu bez poruch (krystaly s nepatrnou hustotou dislokací); reálné hodnoty meze skluzu $10^7 - 10^8 \text{ N m}^{-2}$

Deformační zpevnění

plastická deformace je ovlivněna pohyblivostí dislokací

během plastické deformace roste hustota dislokací (dislokační zdroje) a mění se jejich orientace

dislokace ležící mimo rovinu skluzu se nepohybují, aktivní dislokace pohybující se krystalem jimi musí procházet

defekty mřížky (shluky cizích atomů) komplikují pohyb dislokací (precipitační zpevnění)

→ pro pokračování deformace je nutné dodat energii (zvyšování napětí v průběhu plastické deformace)

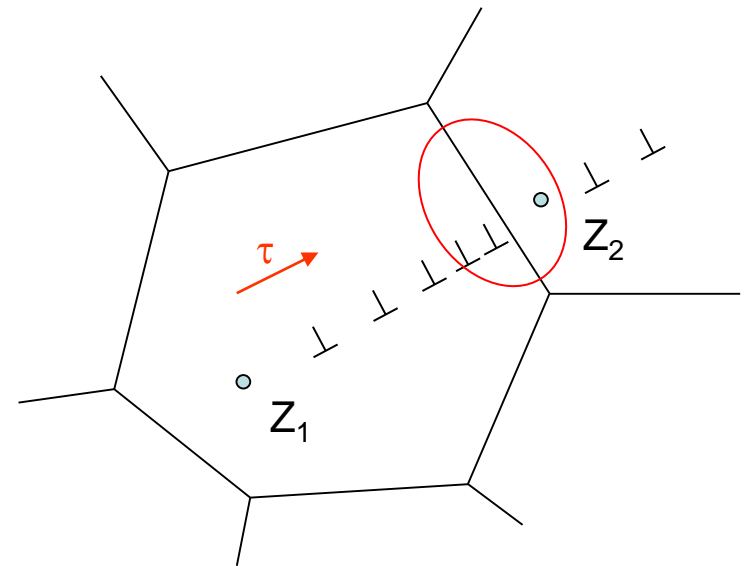
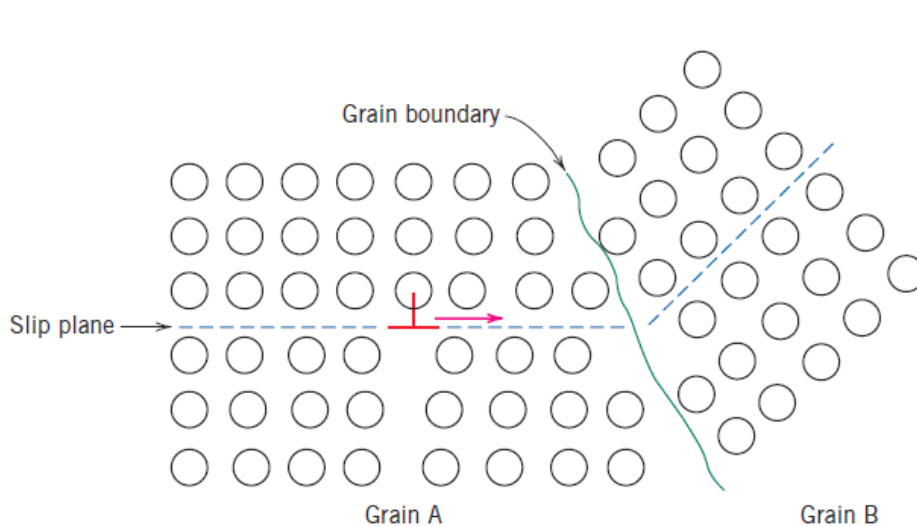
polykrystalické materiály: zpevnění hranicemi zrn

hranice zrn – neprostupná překážka pro pohyb dislokací (přerušení skluzových rovin na rozhraní mezi zrny a změna jejich orientace)

→ hromadění dislokací ve skluzové rovině před hranicí zrna

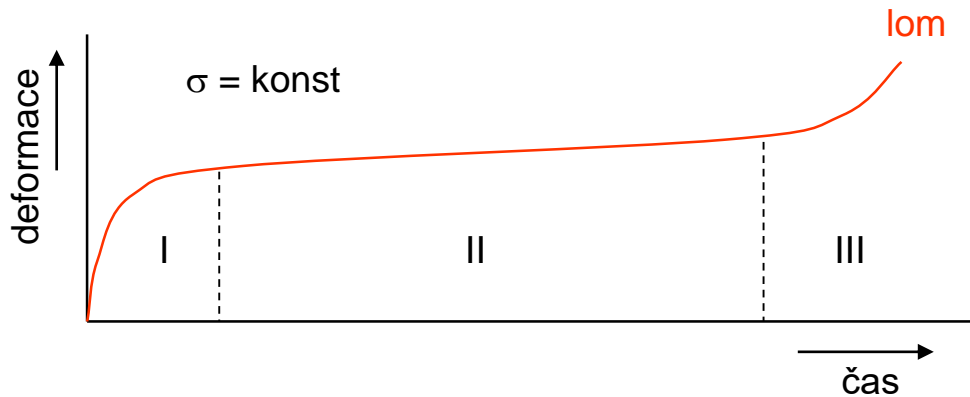
napěťové pole dislokací

- postupné omezení činnosti zdroje až do jeho zastavení (zpomalení skluzu a zpevnění uvnitř zrna)
- aktivace nového zdroje dislokací v sousedním zrně
- vyvolání skluzu v jiných skluzových rovinách



Tečení (creep)

plastická deformace při dlouhodobě působícím konstantním napětí, končí lomem
častý jev při zvýšené teplotě ($T > 0,3 T_t$)



vysokoteplotní tečení

$$\varepsilon = \alpha t + \beta t^n$$

α, β - empirické konstanty, $n = 1/3$

I. neustálené tečení: napětí vyvolá pohyb dislokací a vznik nových dislokací (zdroje) → roste hustota dislokací, zpevnování materiálu, postupné zpomalování procesů (konstantní napětí)

II. ustálené tečení: dynamická rovnováha mezi zpevnováním a odpevnováním (šplhání dislokací mimo rovinu skluzu, anihilace dislokací, změny tvaru zrn, posun zrn podél hranic)

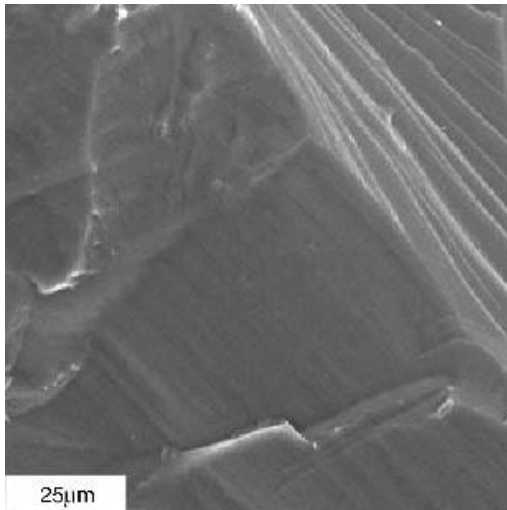
III. zrychlené tečení: zmenšení průřezu, tvorba a zvětšování mikrodutinek a mikrotrhlinek

Lom

přerušení celistvosti materiálu, rozlomené části se oddálí, vzniknou dva nové povrchy

elastické látky s malou oblastí plastické deformace → **křehký lom**; lomová plocha často totožná s některou krystalografickou rovinou s nízkými indexy

látky s výraznou plastickou deformací → **tvárný (houževnatý) lom**; lomu předchází plastická deformace s významným zúžením průřezu v místě lomu, lomová plocha je zvrásněná



štěpné plochy na lomu monokrystalu křemíku



křehký lom vzorku oceli

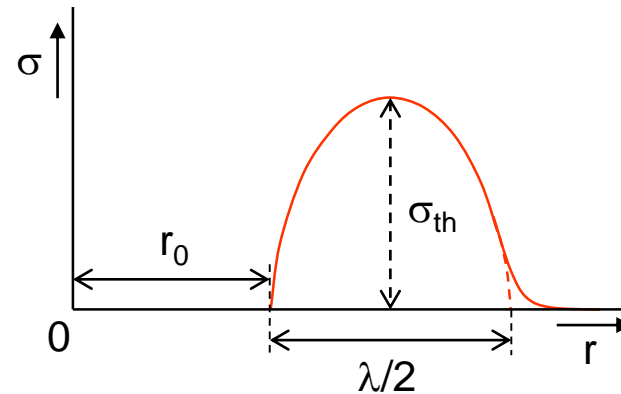
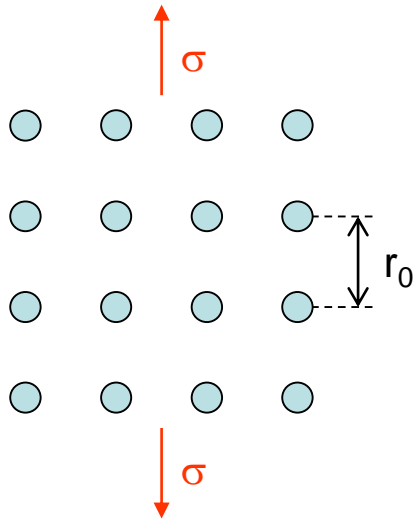


tvárný lom vzorku hliníku

Teoretická pevnost

napětí σ_{th} potřebné k oddělení dvou částí tělesa od sebe

tahové namáhání krystalu s ideální strukturou (křehký lom), odvození vychází z vazebných sil mezi atomy



$$\sigma = \sigma_{th} \sin \frac{2\pi(r - r_0)}{\lambda}, \text{ v elastické oblasti } \sigma = E \frac{r - r_0}{r_0}$$

$$\sigma_{th} \sin \frac{2\pi(r - r_0)}{\lambda} = E \frac{r - r_0}{r_0}$$

deformační práce (W_D) při lomu ideálně křehkého tělesa je rovna povrchové energii dvou nově vzniklých povrchů (2γ)

$$W_D = \int_{r_0}^{r_0+\lambda/2} \sigma dr = \int_{r_0}^{r_0+\lambda/2} \sigma_{th} \sin \frac{2\pi(r - r_0)}{\lambda} dr$$

pro $(r - r_0) \ll r_0$ $\sin \frac{2\pi(r - r_0)}{\lambda} \sim \frac{2\pi(r - r_0)}{\lambda} \rightarrow W_D = \sigma_{th} \frac{\lambda}{\pi}$

$$\sigma_{th} \frac{\lambda}{\pi} = 2\gamma \rightarrow \lambda = \frac{2\gamma\pi}{\sigma_{th}}$$

$$\sigma_{th} \frac{2\pi(r - r_0)}{\lambda} = E \frac{r - r_0}{r_0} \rightarrow \sigma_{th} = \sqrt{\frac{E\gamma}{r_0}}$$

hodnoty E , γ , a r_0 lze stanovit experimentálně a vypočítat σ_{th}

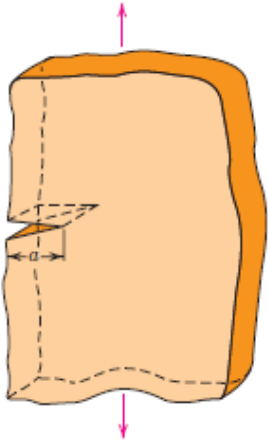
$\sigma_{th} \sim 10^{10} \text{ N m}^{-2} \rightarrow$ experimentálně naměřené hodnoty o 2 až 3 řády nižší

Kritická pevnost

lomové napětí ovlivňují materiálové vady (mikrodutinky a mikrotrhlky)

zárodky přítomné v materiálu, mohou vznikat i během namáhání - nakupení dislokací a dalších poruch (vakancí) apod., působením napětí zárodky rostou

reálný lom nastává postupně

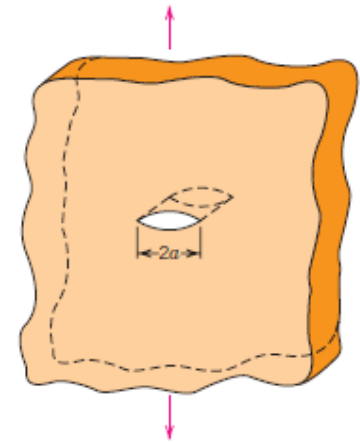


elastická síla v materiálu vyvolává odpor proti napětí, v bezprostředním okolí mikrotrhlky (v jejím čele) tato síla nepůsobí

Griffithovo kritérium lomu: úbytek elastické deformační energie musí být větší než přírůstek energie nově vznikajících povrchů

odvození kritické pevnosti:

elastické těleso o jednotkové tloušťce obsahuje mikrodutinku eliptického průřezu o velikosti $2c$



úbytek elastické deformační energie při zvětšení mikrotrhliny o dc

$$dW_D = -\frac{2\pi c\sigma^2}{E} dc$$

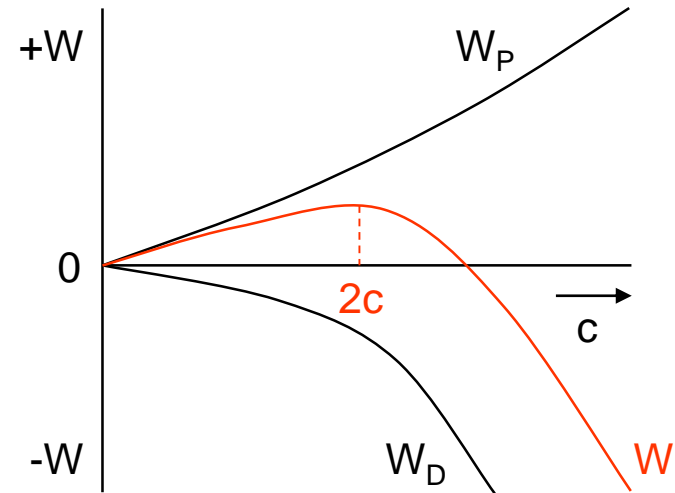
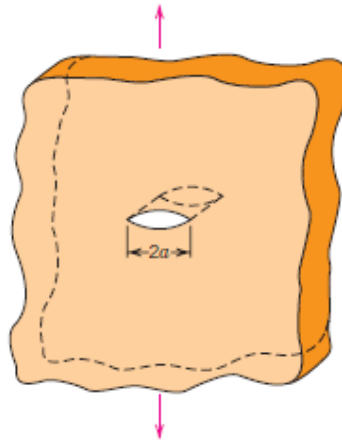
přírůstek povrchové energie při zvětšení mikrotrhliny o dc $dW_P = 4\gamma dc$

mikrotrhlina se začne katastroficky šířit, když dosáhne kritické velikosti $2c$, celková energie systému ($W_D + W_P$) dosáhne maxima

při vyrovnání obou energií platí

$$\frac{dW_D}{dc} + \frac{dW_P}{dc} = 0$$

$$\sigma_{kr} = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi c}}$$



Griffithův vzorec byl odvozen pro případ, že tahové napětí působí pouze v rovinné vrstvě, ve směru její tloušťky je zanedbatelné

kritická velikost mikrotrhlin u křehkých látek $\sim 10^{-7}$ m

Tvárný lom

mez pevnosti roste se schopností plastické deformace ($\sigma_p > \sigma_s$)

nutno vzít v úvahu energii lokální plastické deformace doprovázející lom

$$\sigma_{kr} = \sqrt{\frac{2(\gamma + \gamma_{pl})E}{\pi C}}$$

γ_{pl} – energie lokální plastické deformace v čele a blízkém okolí mikrotrhlky, závisí na teplotě, při velmi nízkých teplotách se blíží nule, při vyšších teplotách $\gamma_{pl} \gg \gamma$

tahové napětí → plocha průřezu se zmenšuje, materiál se přetrhne

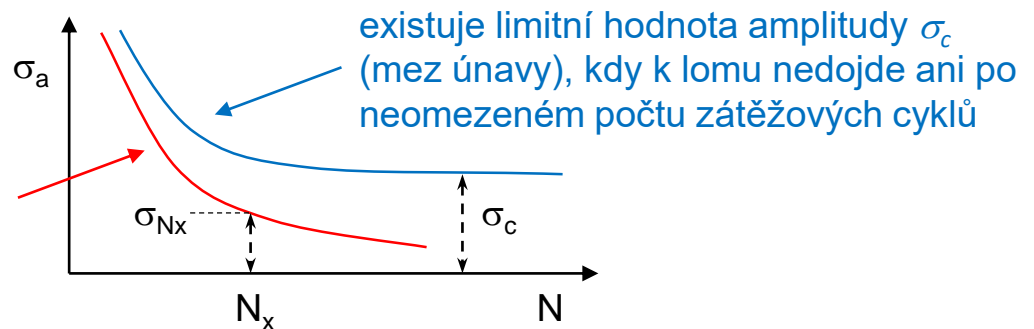
Únavový lom

cyklické zatěžování snižuje mez pevnosti (k lomu dojde i při $\sigma < \sigma_s$)

kmitavý pohyb dislokací → vzájemné interakce, omezení pohyblivosti v určitých oblastech a vytvoření mozaikové struktury materiálu, zvýšení pravděpodobnosti vzniku mikrotrhlin

závisí na počtu a amplitudě zátěžových cyklů (Wöhlerova křivka)

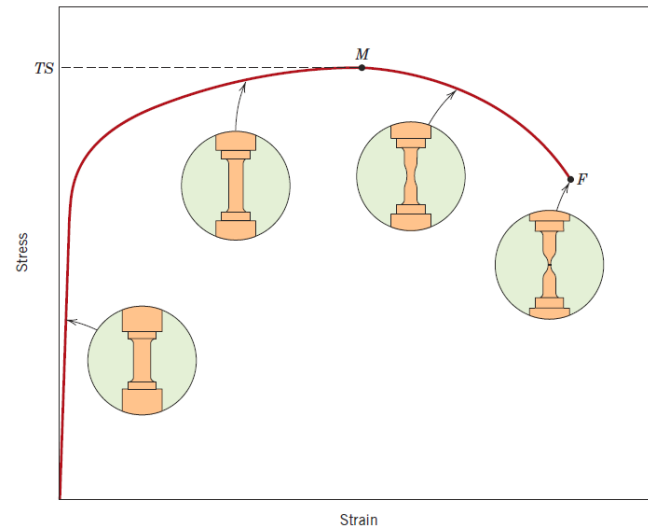
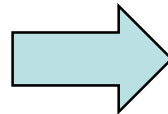
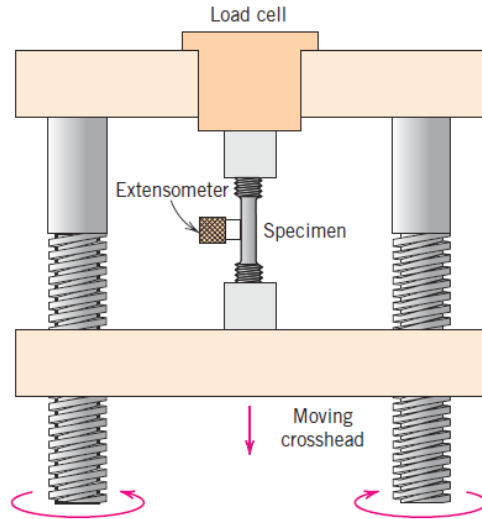
k lomu dojde při jakékoli amplitudě σ_a po dostatečném počtu zátěžových cyklů, deklaruje se životnost jako počet cyklů N_x při amplitudě zatěžování σ_{Nx}



Zkoušky deformačního a lomového chování

Zkouška tahem

těleso uchycené k dynamometru a pohyblivému příčnicku je postupně zatěžováno, deformace se registruje průtahoměrem



Zkouška ohybem

zkušební tyč se položí na dvě opory, trn působí tlakem uprostřed (tříbodový ohyb) nebo působí dva trny symetricky umístěné vzhledem ke středu (čtyřbodový ohyb)

Zkouška rázem v ohybu

zkušební tyč s vytvořeným defektem (vrubem) je přeražena nárazem kyvadlového kladiva (dynamické zatížení), vyhodnocuje se spotřebovaná energie

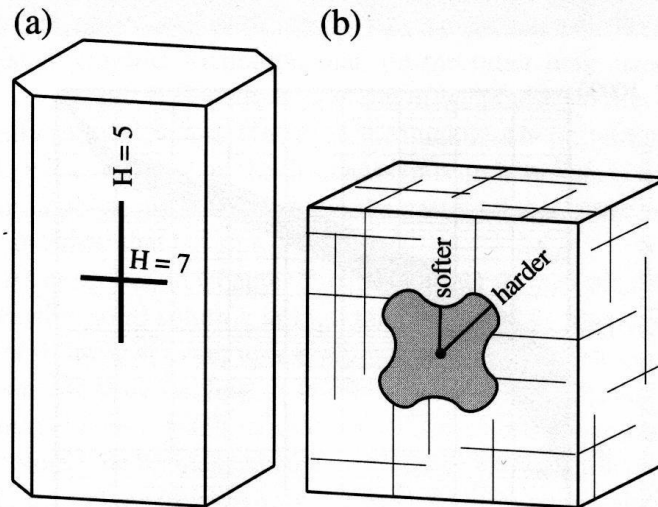
Tvrdość

odpor látky proti plastické deformaci povrchu

neexistuje obecná závislost mezi podnětem (mechanickou silou) a odezvou materiálu (tvrdoostí)

vliv mnoha parametrů (anizotropie krystalové struktury → měřená krystalová plocha, poruchy mřížky, monokrystal vs. polykrystalická látka, homogenita a mikrostruktura materiálu aj.), potíže s definicí tvrdości – různé metody stanovení tvrdości

nejčastěji se měří odolnost proti vniknutí cizího tělesa (vrypová nebo vtisková zkouška – do povrchu se vtlačují tvrdší tělíska)



(a) krystal kyanitu (Al_2SiO_5)

(b) krystal halitu (NaCl)

Mohsova stupnice tvrdosti

relativní stupnice pro porovnání tvrdosti minerálů – 10 minerálů, tvrdší minerál rýpe povrch měkčího, zkoumaná látka se řadí mezi dva standardní minerály ve stupnici

stupeň tvrdosti podle Mohse	minerál	chemický vzorec
10	diamant	C
9	korund	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
8	topaz	$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$
7	křemen	$\alpha\text{-SiO}_2$
6	živec (ortoklas)	KAlSi_3O_8
5	apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$
4	kazivec (fluorit)	CaF_2
3	vápenec (kalcit)	CaCO_3
2	sádrovec	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
1	mastek (talek)	$\text{Mg}_2\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$

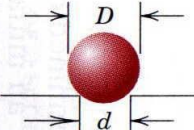
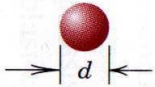

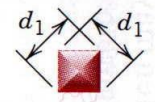
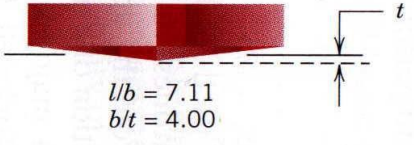
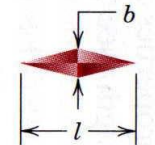
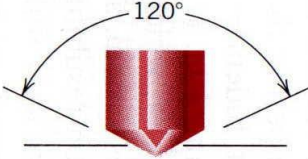



tvrdost minerálů netvoří lineární řadu, Mohsova stupnice byla upravena a rozšířena o pět syntetických materiálů (supertvrde látky – společně s diamantem)

Mohsova stupnice	upravená stupnice	látka	chemický vzorec	tvrdost [GPa] (podle Vickerse)
10	15	diamant přírodní (bort)	C	90 – 100,6
-	14	diamant syntetický (carbonado)	C	80 – 90
-	13	nitrid boritý (kubický)	β -BN	70 – 80
-	12	karbid boru	$B_{12}C_3 - B_{13}C_2$	40 – 48
-	-	karbid křemičitý	SiC	38 – 41
-	11	bor	B	34 – 36
-	10	karbid titanu	TiC	30 – 34
9	9	korund	α -Al ₂ O ₃	20 – 24
-	-	karbid wolframu	WC	17,5 – 18,5
8	8	topaz	Al ₂ SiO ₄ (F,OH) ₂	14,0 – 18,0
7	7	křemen	α -SiO ₂	10,0 – 12,5
-	6	magnetit	Fe ₃ O ₄	6,0 – 8,5
6	-	živec (ortoklas)	KAlSi ₃ O ₈	4,5 – 7,14
-	5	scheelit	CaWO ₄	5,5 – 7,0
5	-	apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH,F,Cl)	2,5 – 5,4
4	4	kazivec (fluorit)	CaF ₂	1,64 – 2,6
-	3	galenit	PbS	1,10 – 1,5
3	-	vápenec (kalcit)	CaCO ₃	0,56 – 1,05
-	2	sůl kamenná	NaCl	0,3 – 0,9
2	-	sádrovec	CaSO ₄ ·2H ₂ O	0,35 – 0,8
1	1	mastek (talek)	Mg ₂ Si ₄ O ₁₀ ·Mg(OH) ₂	0,024 – 0,11

Vtiskové metody

různé metody vyjadřují tvrdost jako poměr mezi definovanou zátěží indentorů různého tvaru a plochy nebo hloubky vtisku.

Table 6.4 Hardness Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> Diamond cone $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres 	 	 	<ul style="list-style-type: none"> 60 kg 100 kg 150 kg } Rockwell <ul style="list-style-type: none"> 15 kg 30 kg 45 kg } Superficial Rockwell	

^a For the hardness formulas given, P (the applied load) is in kg, while D , d , d_1 , and l are all in mm.

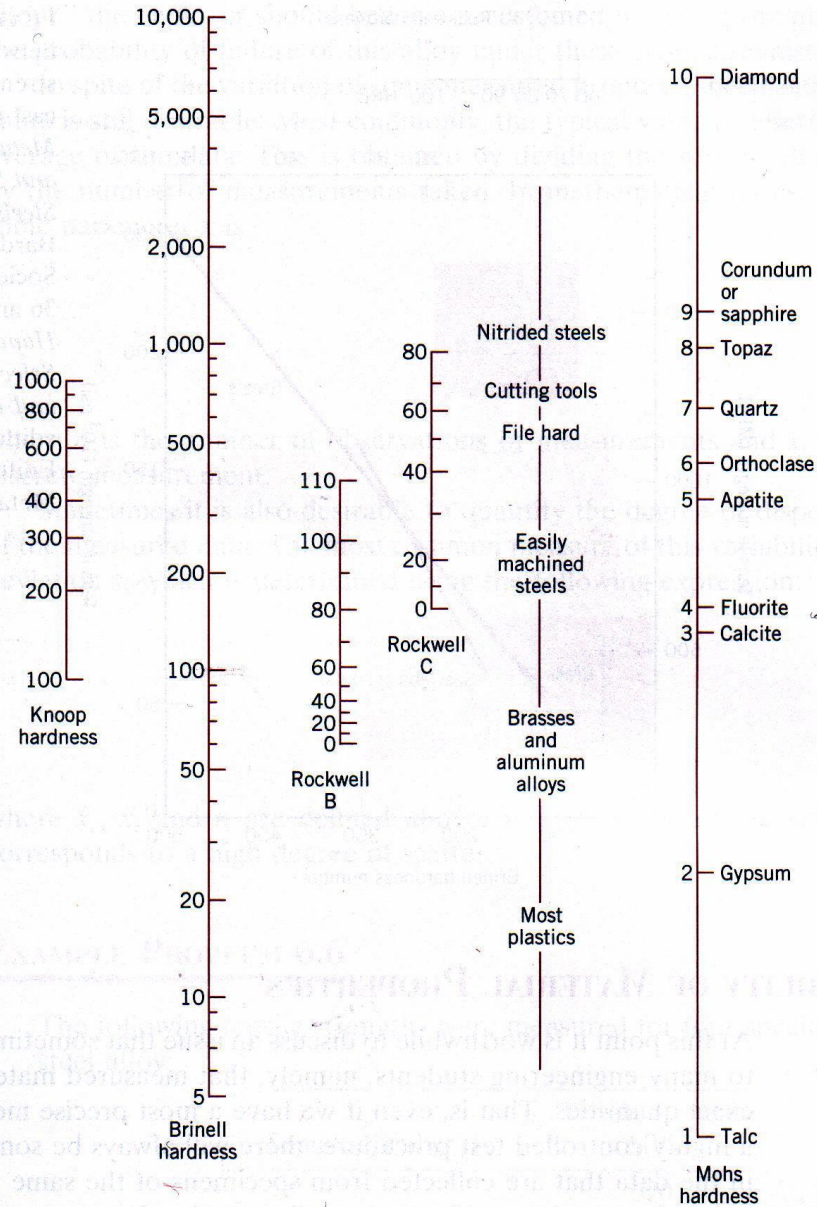


TABLE 6-5 ■ Comparison of typical hardness tests

Test	Indenter	Load	Application
Brinell	10-mm ball	3000 kg	Cast iron and steel
Brinell	10-mm ball	500 kg	Nonferrous alloys
Rockwell A	Brale	60 kg	Very hard materials
Rockwell B	1/16-in. ball	100 kg	Brass, low-strength steel
Rockwell C	Brale	150 kg	High-strength steel
Rockwell D	Brale	100 kg	High-strength steel
Rockwell E	1/8-in. ball	100 kg	Very soft materials
Rockwell F	1/16-in. ball	60 kg	Aluminum, soft materials
Vickers	Diamond pyramid	10 kg	All materials
Knoop	Diamond pyramid	500 g	All materials

přepočet tvrdosti H_{15} z tvrdosti podle Vickers (HV): $H_{15} = 0,67 HV^{-1/3}$

W.D. Callister, Jr.: Materials Science and Engineering, An Introduction (5th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2000.

Askeland D. R., Phulé P. P.: The Science and Engineering of Materials (4th Edition). Thomson Brooks/Cole 2003.

Tento výukový materiál je autorským dílem, které je chráněno autorským právem VŠCHT Praha.

Některé části přednášky vycházejí z autorských děl třetích osob, která VŠCHT Praha užívá pro účely výuky svých studentů na základě zákonné licence.

Obsah této přednášky je určen výlučně pro výuku studentů VŠCHT Praha.

Obsah přednášky nesmí být rozmnožován, zaznamenáván, napodobován, publikován ani jinak rozšiřován bez písemného souhlasu majitele autorských práv.

Autorské právo neporušuje ten student VŠCHT Praha, který výlučně pro svou osobní potřebu zhotoví záznam či napodobeninu díla nebo užije dílo jiným způsobem, který dle zákona autorské právo neporušuje.

© VŠCHT Praha 2021