

## Dislokace – literatura :

### **Stručná shrnutí základních faktů :**

D. Hull, D.J. Bacon: Introduction to dislocations, Pergamon Press 1995

J. Pluhař, A. Puškár, J. Koutský, K. Macek, V. Beneš : Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu, SNTL, 1987

L. Ptáček, D. Just, J. Švejcar: Fyzika kovů

J. Pokluda, F. Kroupa, L. Obdržálek: Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek, učební texty VUT, PCDIR Brno, 1994

F. Kroupa, A. Machová: Fyzika kovů I (Teorie dislokací), skripta ČVUT, 1988

### **Detailní knihy :**

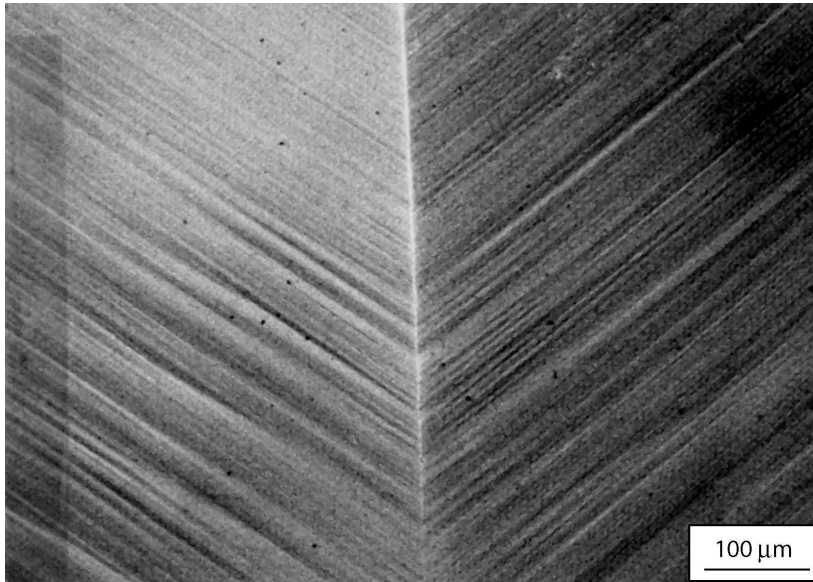
J.P. Hirth, J. Lothe : Theory of dislocations, John Wiley, 1992

J. Friedel: Dislocations, Pergamon Press 1967

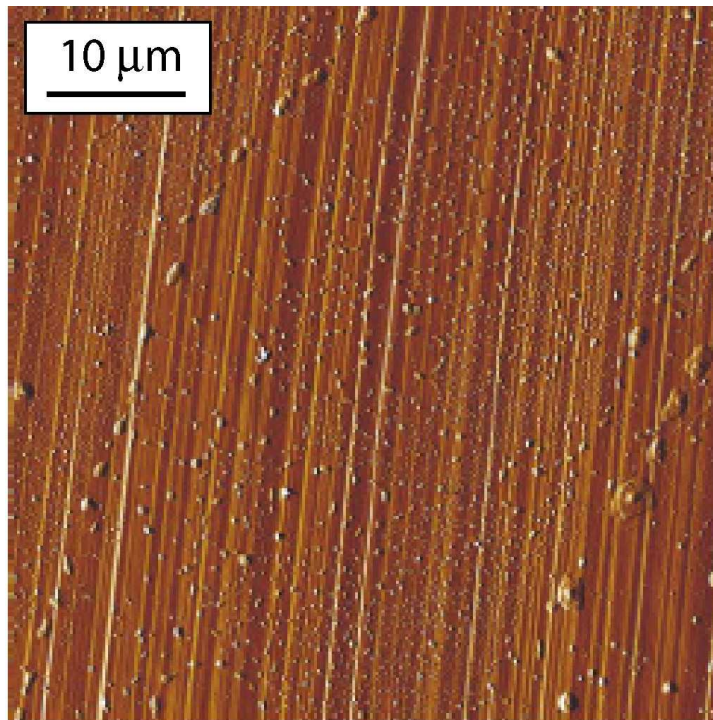
F.R. Nabarro: Theory of crystal dislocations, Dover 1987

# SKLUZOVÉ LINIE

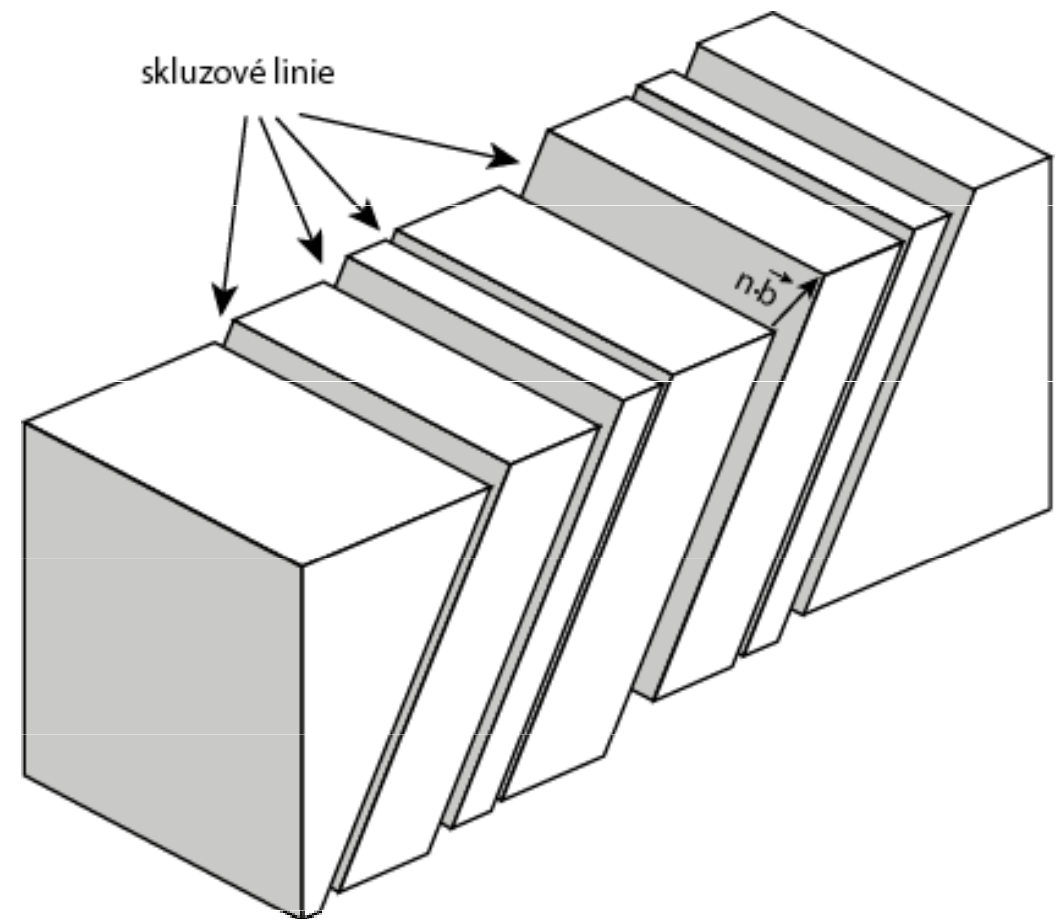
Povrch fcc materiálů po tahové deformaci



Světelný mikroskop

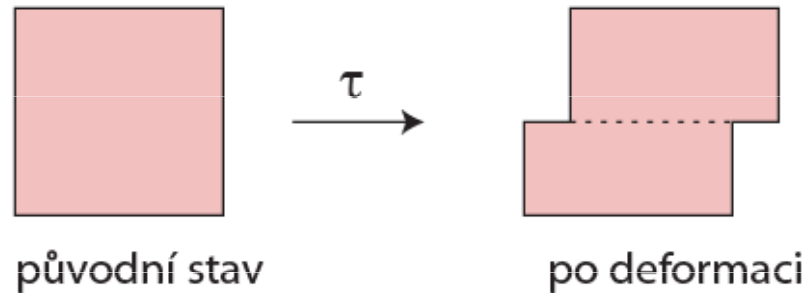


AFM



# DISLOKACE

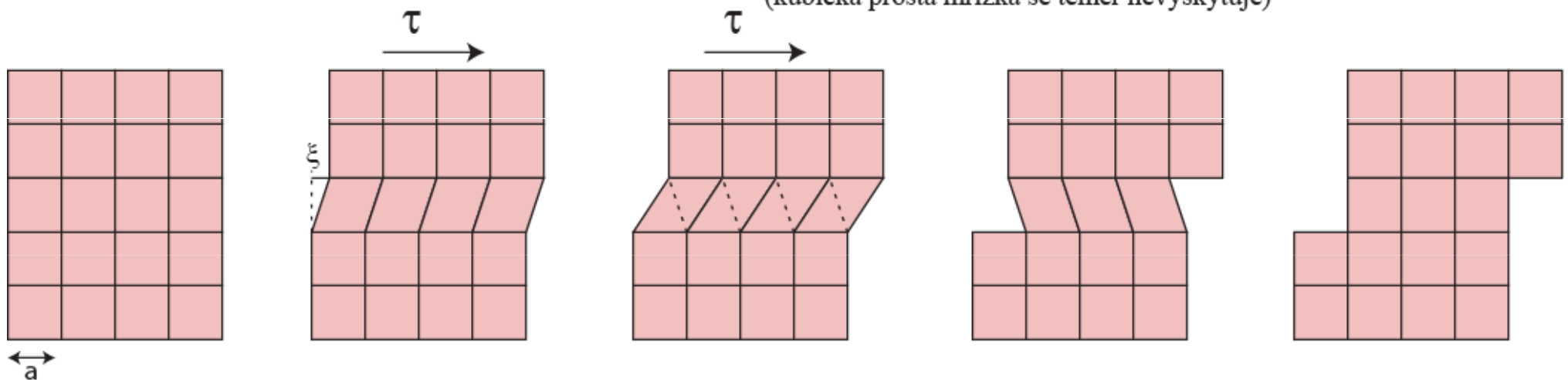
Plastická deformace:



Jaký je mechanismus?

## MODEL 1) - pokluz dokonalé mřížky

(kubická prostá mřížka se téměř nevyskytuje)



Výpočet  $\tau_c$  : ab initio nebo klasicky

$$W(x) = W_0 - W_1 \cos 2\pi \frac{x}{a}$$

$$\tau_c \sim 0.16 G \sim 0.06 E$$

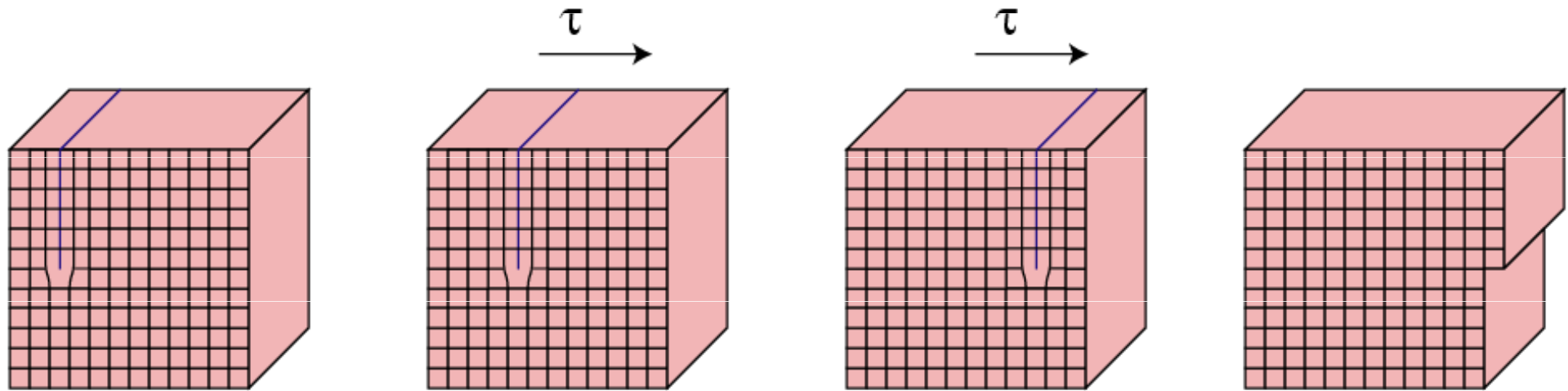
řádově: 10 GPa, experiment : 1 MPa

=> model 1) nevyhovuje

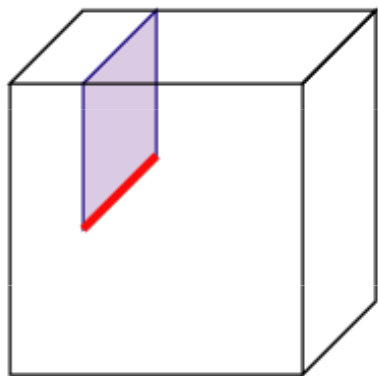
Kov	$\tau_c$ z experimentu [MPa]	G [GPa]	zlomek $\tau_{th}/\tau_c$ $\tau_{th}$ vypočtené jako G/10
$\alpha$ Fe	28	84.7	300
Al	0.9	27.7	3 100
Ni	2.6	78.5	3 000
Cu	1.4	46.4	3 300
Zn	0.2	37.9	19 000
Ti	14	40.6	290
Mg	0.4	17.7	4 400
Be	1.4	150	11 000
Co	6.5	76.3	1 200
Ag	0.4	29.4	7 400
Au	0.5	28.2	5 600
whisker Fe	$1.1 \cdot 10^4$ (lom)	84.7	0.77

# DISLOKACE

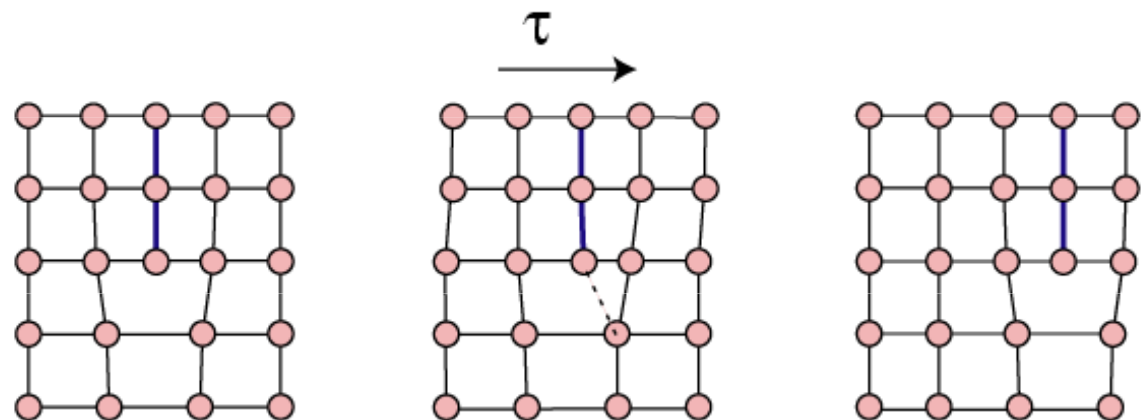
## MODEL 2) - pohyb poruch



dislokace "hranová"

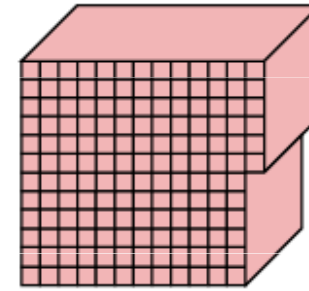
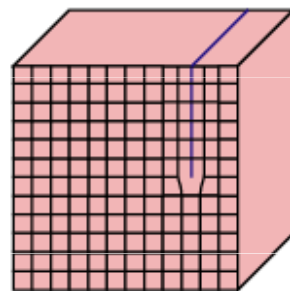
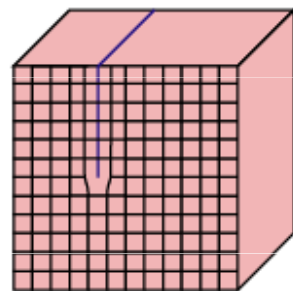
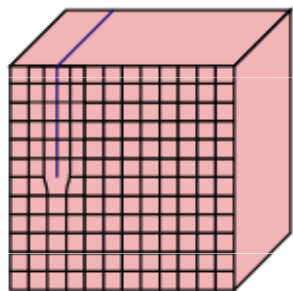


dislokační čára



POHYB DISLOKACÍ = PLASTICKÁ DEFORMACE

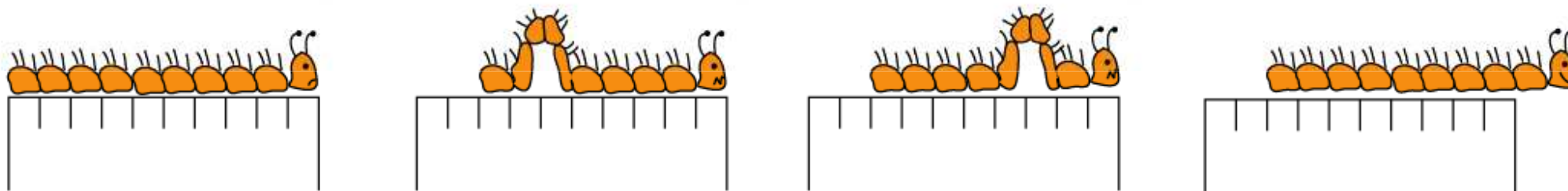
# DISLOKACE - ANALOGIE



1) Koberec profesora Motta

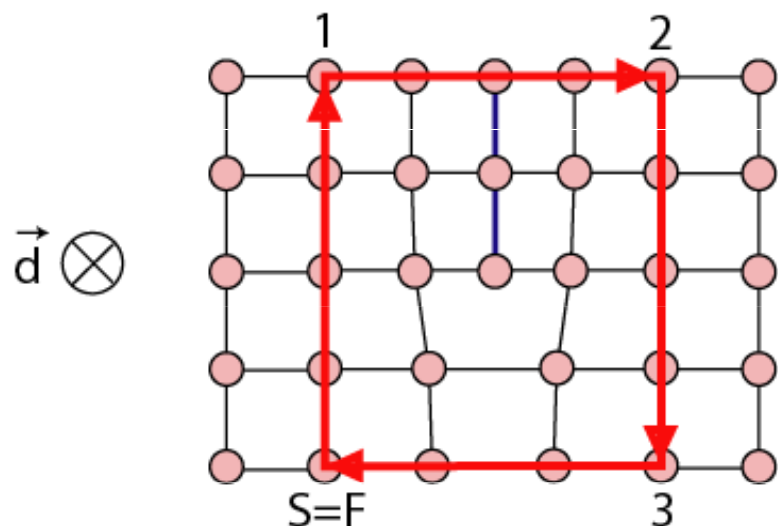


2) Píd'alka



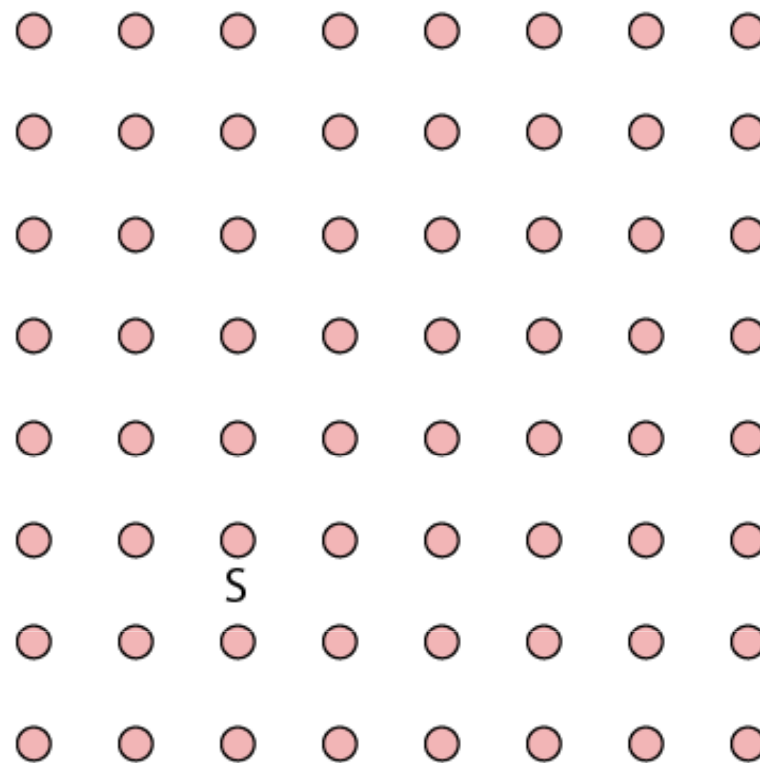
# DEFINICE BURGERSOVA VEKTORU

- 1) Zvolit orientaci dislokační čáry
- 2) Zvolit uzavřený okruh okolo dislokace (mat. kladný směr)



Convence FS/RH

- 3) Zopakovat stejný okruh v dokonalém krystalu  $\Rightarrow$  okruh bude neuzavřený



$$\vec{b} = \vec{FS}$$

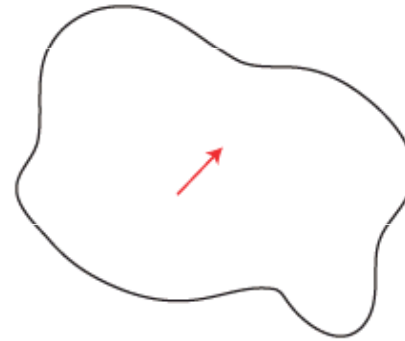
# VLASTNOSTI DISLOKACÍ

## 1) Dislokace je určena vektory $\vec{b}$ a $\vec{d}$

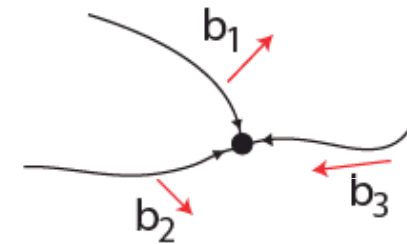
●  $\vec{b}$  Vektor spojující dva nejbližší sousedy

$$\text{fcc: } \vec{b} = \frac{a}{2} \langle 110 \rangle$$

$\vec{b}$  je podél celé dislokace stejný



Dislokační reakce:  $\vec{\sum} b_i = 0$



●  $\vec{d}$  Vektor dislokační čáry: jednotkový vektor tečný k dislokaci.

$\vec{b}$  a  $\vec{d}$  definují SKLUZOVOU ROVINU

Pozorování: skluzová rovina je často nejhustěji obsazená krystalografická rovina. Př: fcc - {111}

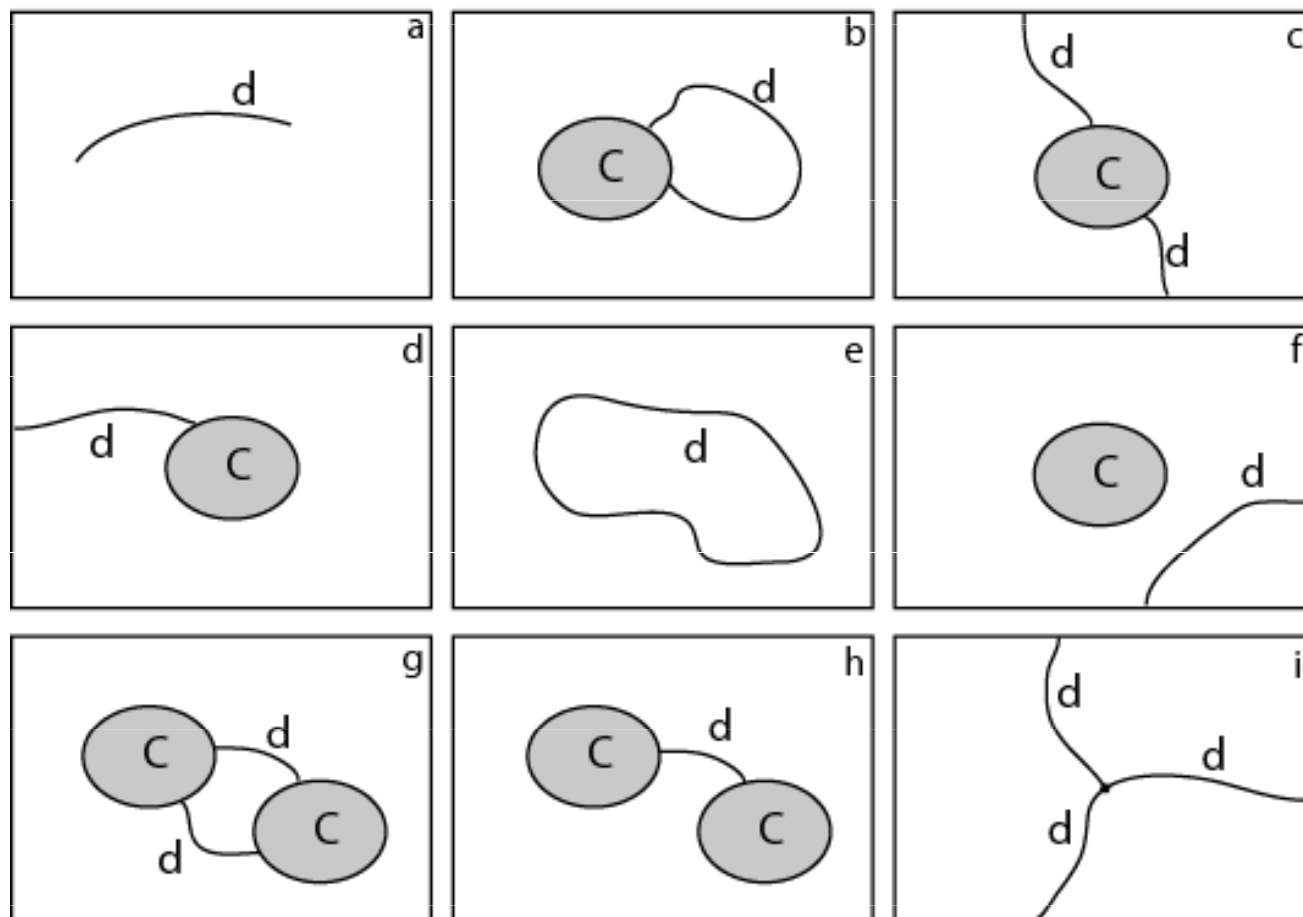
Def.:  $\vec{d} \parallel \vec{b}$  ...dislokace šroubová

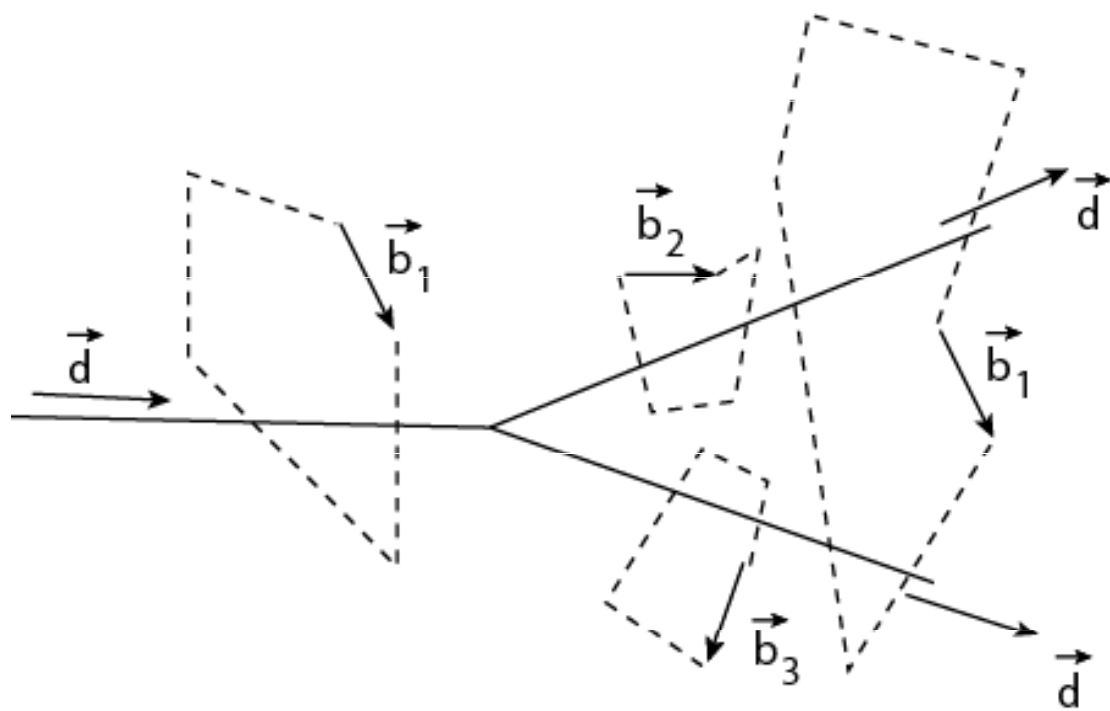
$\vec{d} \perp \vec{b}$  ...dislokace hranová

jiný úhel ...dislokace smíšená

Dislokace nemůže mít neuzavřené konce v krystalu.

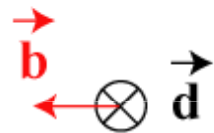
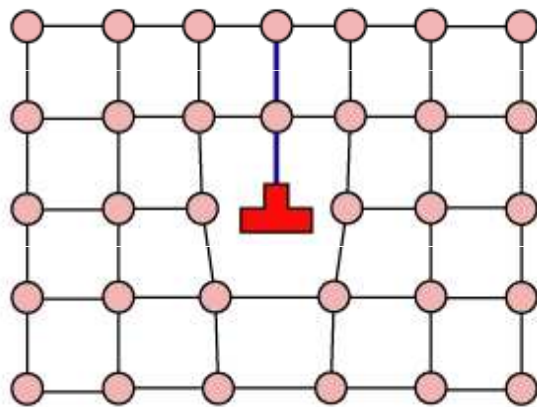




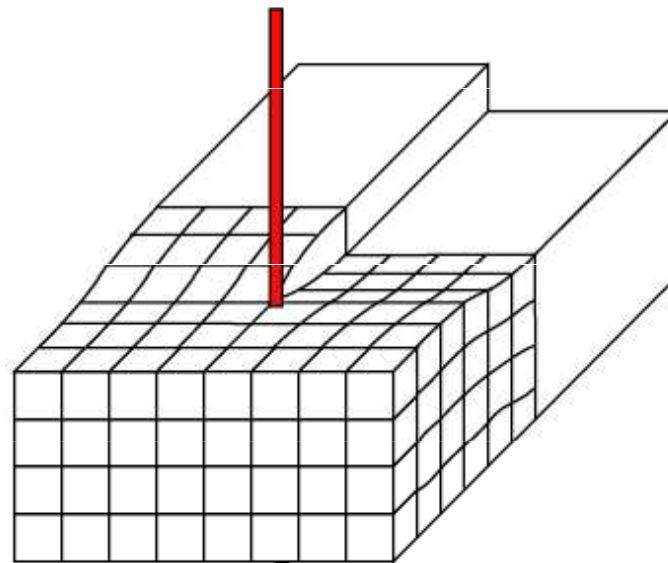


$$\vec{b}_1 = \vec{b}_2 + \vec{b}_3$$

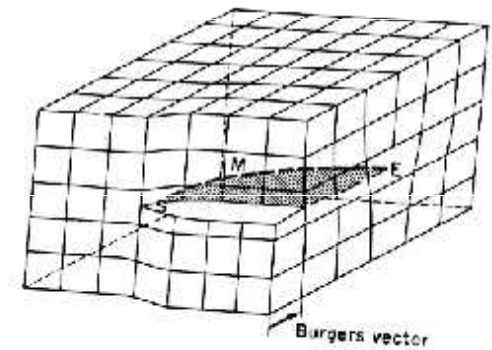
## Dislokace hranová

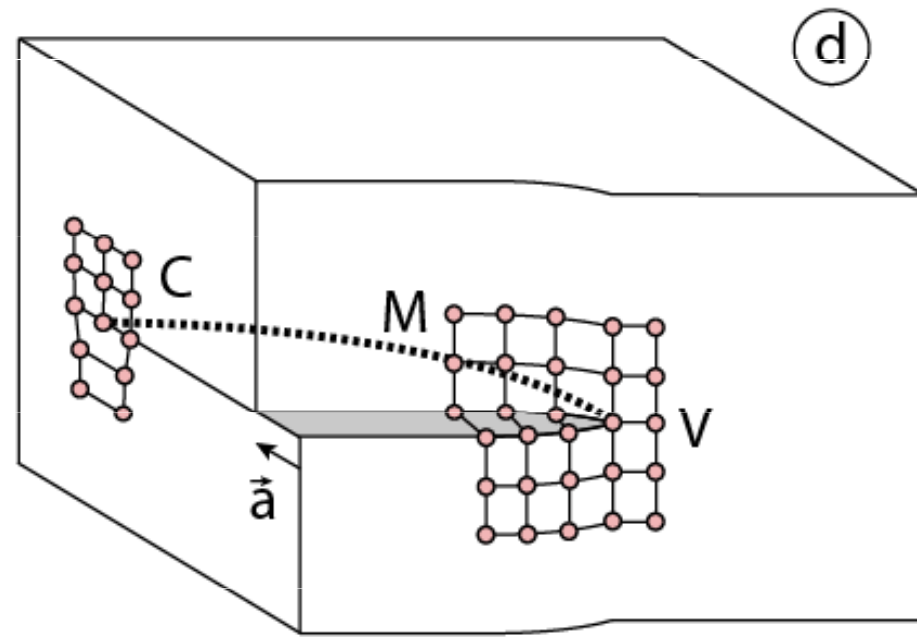
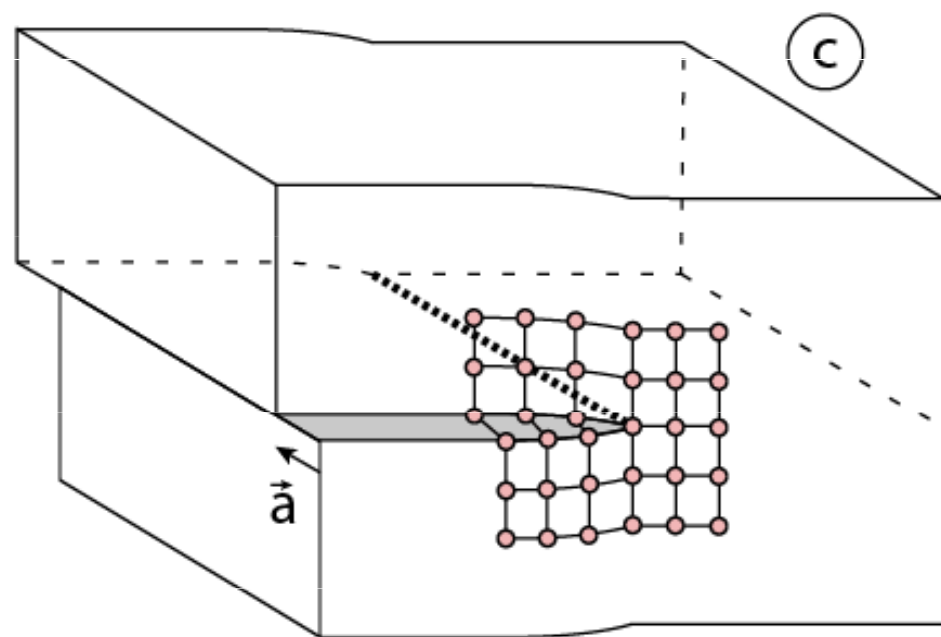
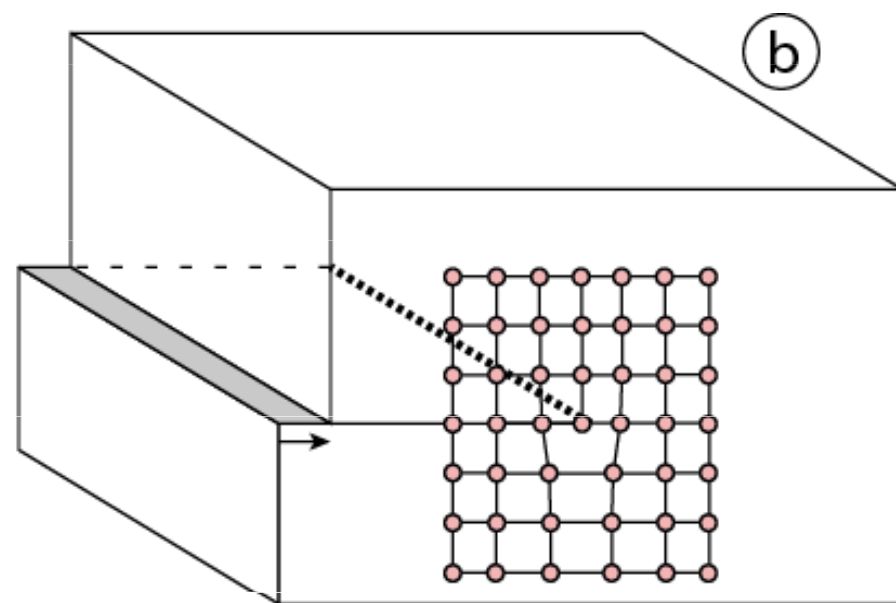
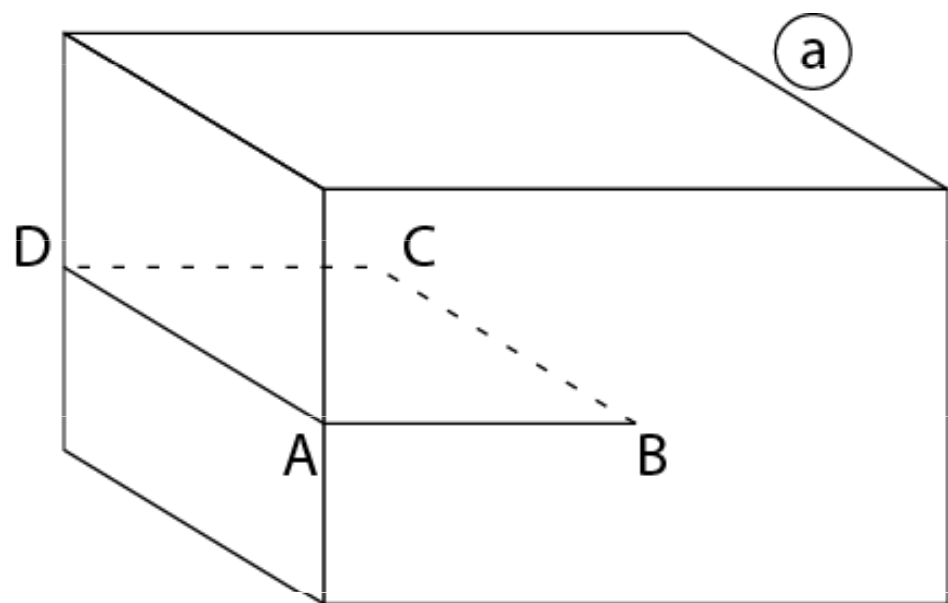


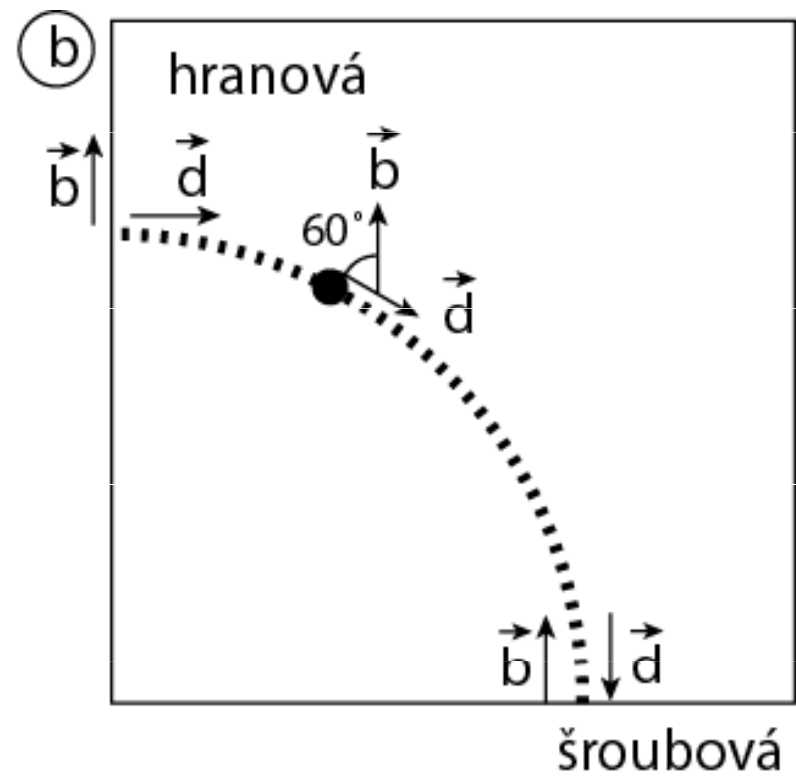
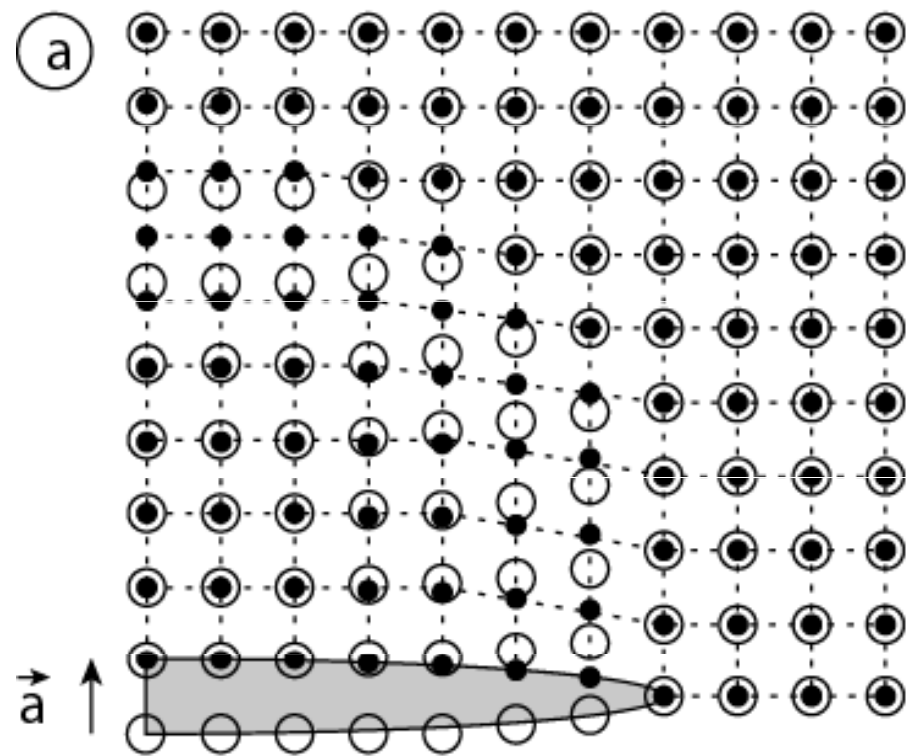
## Dislokace šroubová



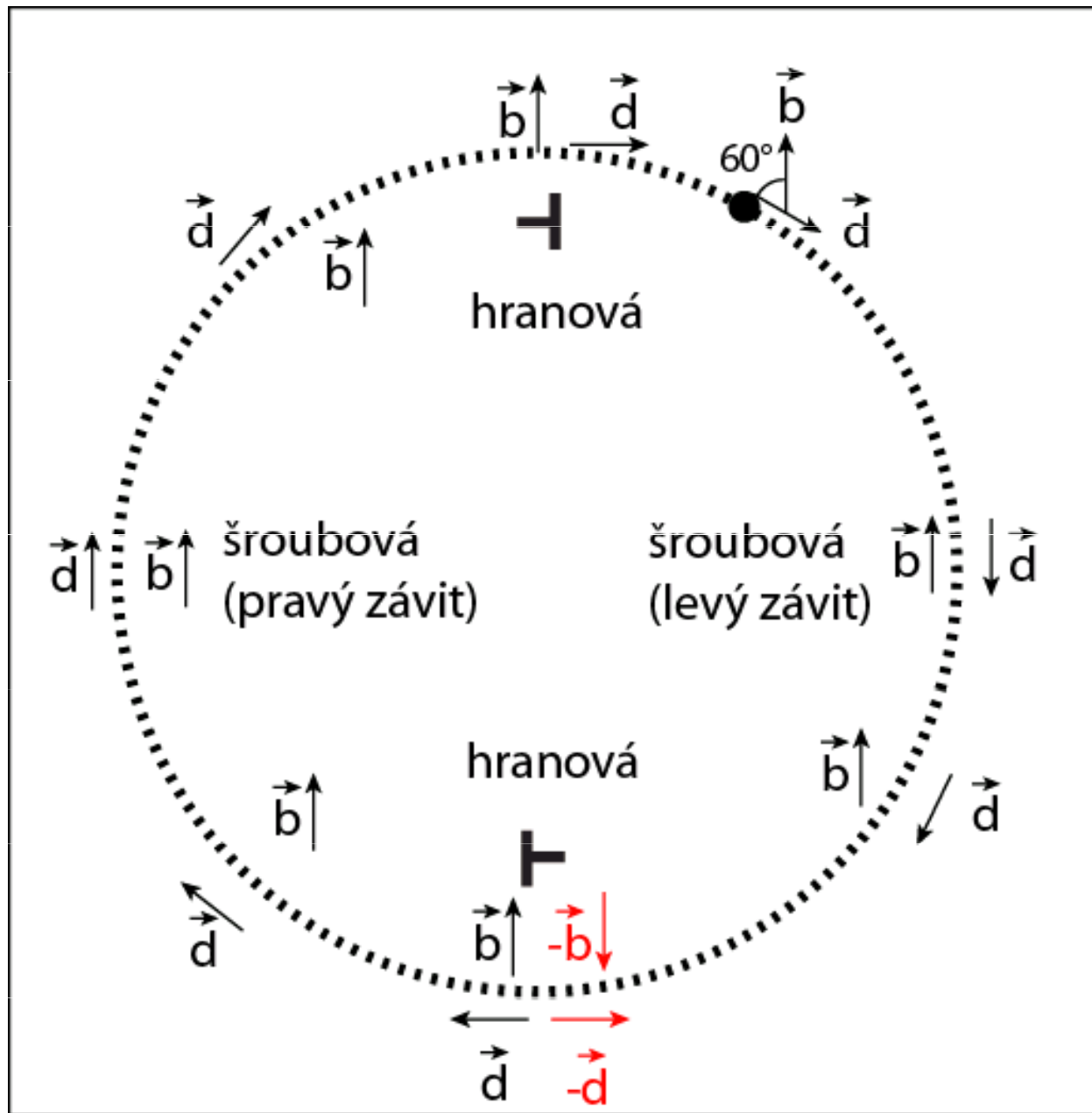
## Dislokace smíšená



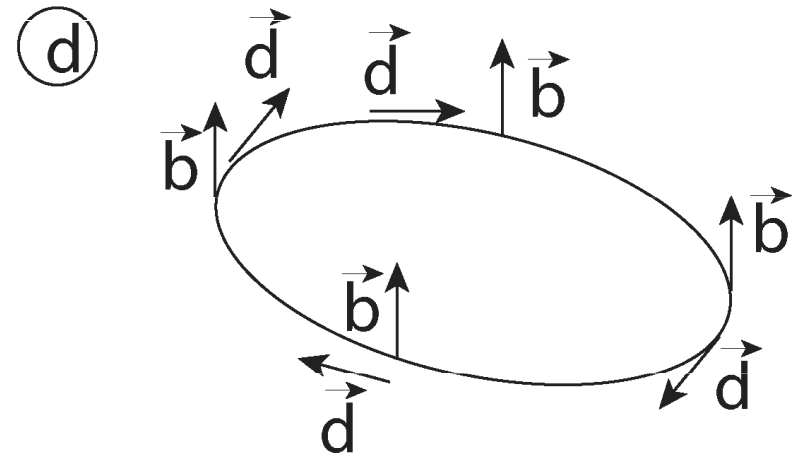
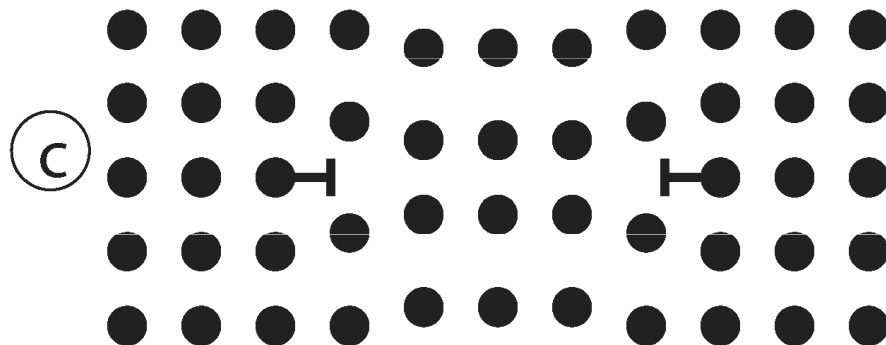
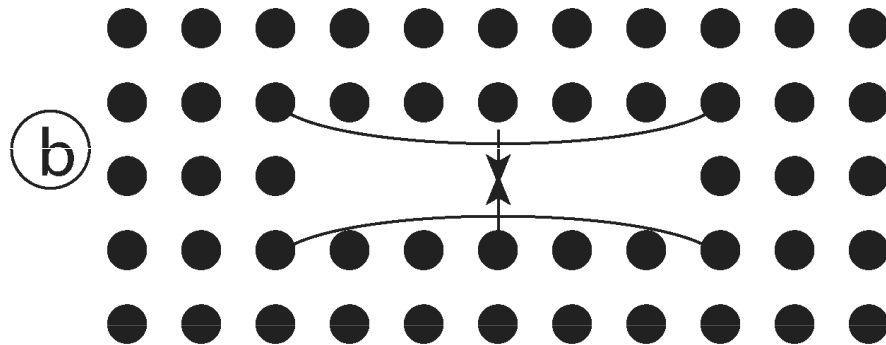
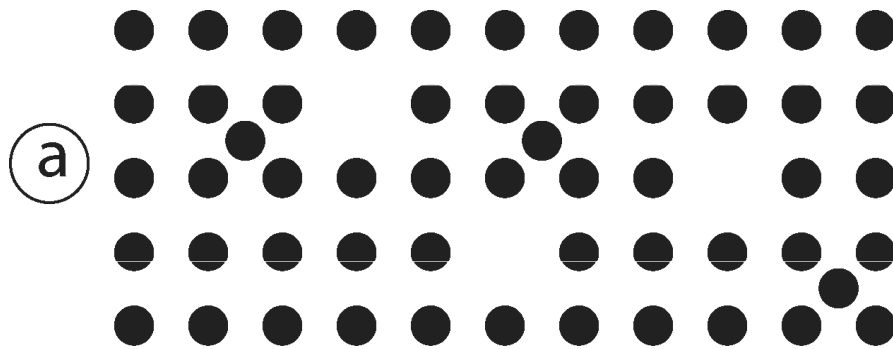




# SKLUZOVÁ DISLOKAČNÍ SMYČKA



# VAKANTNÍ PRIZMATICKÁ DISLOKAČNÍ SMYČKA



# VLASTNOSTI DISLOKACÍ

## 2) Dislokace kolem sebe vytváří pole napětí $\overline{\sigma}$

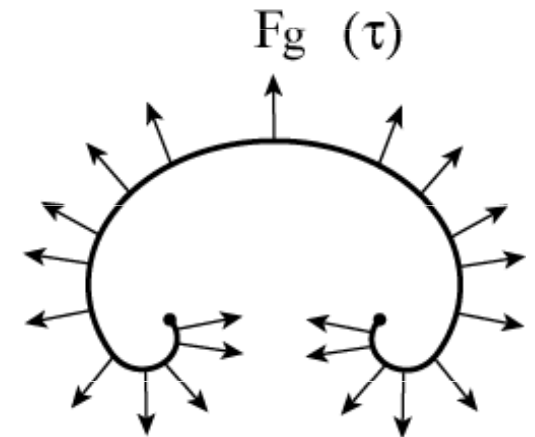
- $\sigma$  klesá jako  $1/r$   
=> interakce na dlouhou vzdálenost

## 3) Dislokace je ovlivňována vnějším napětím $\overline{\sigma}$

- Peach & Koehler :  $\vec{F} = (\vec{b} \cdot \overline{\sigma}) \times \vec{d}$

(! síla na jednotku délky !)

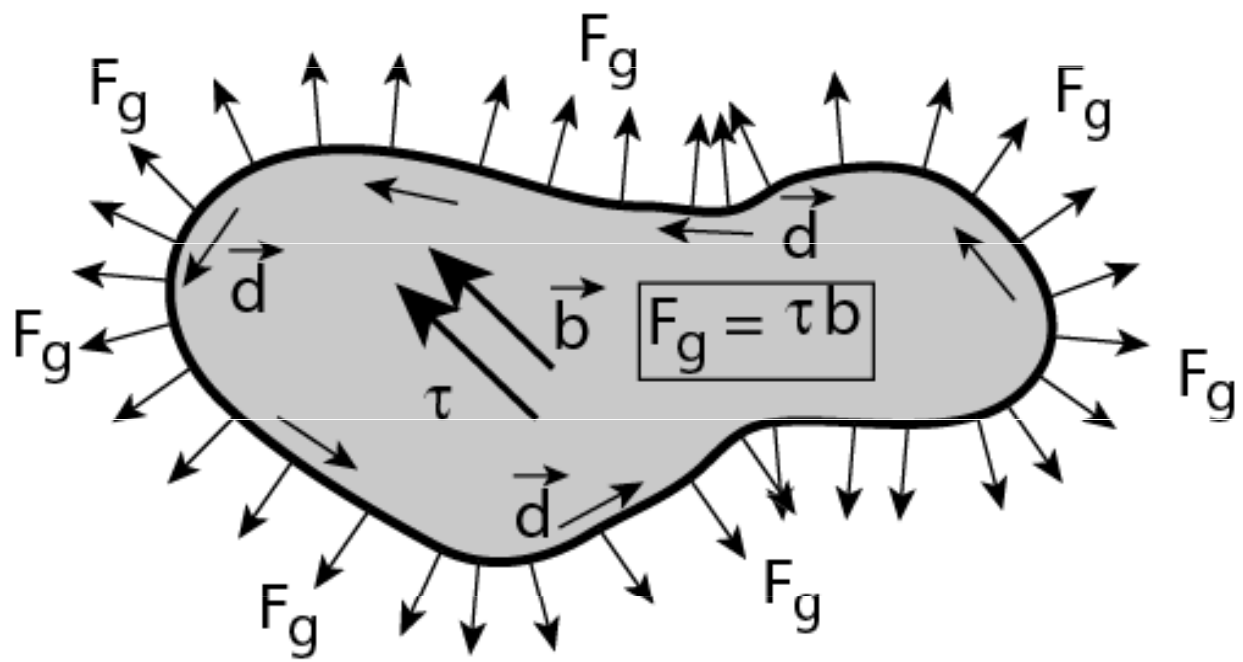
- dislokace se může pohybovat díky  $\overline{\sigma}$
- za nízkých homologických teplot - pohyb skluzem ve skluzové rovině



$$F_g = \tau b$$

- $F_g$  - průmět síly P & K do skluzové roviny a do skluzového směru ( $= \vec{b}$ )
- $F_g$  kolmá na dislokační čáru, konstantní velikost podél d.č.
- $\tau$  - složka  $\overline{\sigma}$  ve skluzové rovině a ve směru  $\vec{b}$





## Šroubová dislokace

Souřadné osy jsou zvoleny tak,  
že dislokace leží v ose  $x_3$ :

$$\vec{a} = [001]$$

$$\vec{b} = [00b]$$

	Kartézské souřadnice	Válcové souřadnice
$\vec{u}$	$u_1 = 0$ $u_2 = 0$ $u_3 = \frac{b}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{x_2}{x_1}$	$u_r = 0$ $u_\theta = 0$ $u_z = \frac{b}{2\pi} \theta$
$\varepsilon$	$\varepsilon_{11} = 0$ $\varepsilon_{22} = 0$ $\varepsilon_{33} = 0$ $\varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} = \frac{b}{4\pi} \frac{x_1}{x_1^2 + x_2^2}$ $\varepsilon_{13} = \varepsilon_{31} = -\frac{b}{4\pi} \frac{x_2}{x_1^2 + x_2^2}$ $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = 0$	$\varepsilon_{rr} = 0$ $\varepsilon_{\theta\theta} = 0$ $\varepsilon_{zz} = 0$ $\varepsilon_{\theta z} = \varepsilon_{z\theta} = \frac{b}{4\pi r}$ $\varepsilon_{rz} = \varepsilon_{zr} = 0$ $\varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta r} = 0$
$\sum \varepsilon_{ii}$	0	0
$\sigma$	$\sigma_{11} = 0$ $\sigma_{22} = 0$ $\sigma_{33} = 0$ $\sigma_{23} = \sigma_{32} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{x_1}{x_1^2 + x_2^2}$ $\sigma_{13} = \sigma_{31} = -\frac{Gb}{2\pi} \frac{x_2}{x_1^2 + x_2^2}$ $\sigma_{12} = \sigma_{21} = 0$	$\sigma_{rr} = 0$ $\sigma_{\theta\theta} = 0$ $\sigma_{zz} = 0$ $\sigma_{\theta z} = \sigma_{z\theta} = \frac{Gb}{2\pi r}$ $\sigma_{rz} = \sigma_{zr} = 0$ $\sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta r} = 0$

## Hranová dislokace

Souřadné osy jsou zvoleny tak, že dislokace leží v ose  $x_3$ :

$$\vec{d} = [001]$$

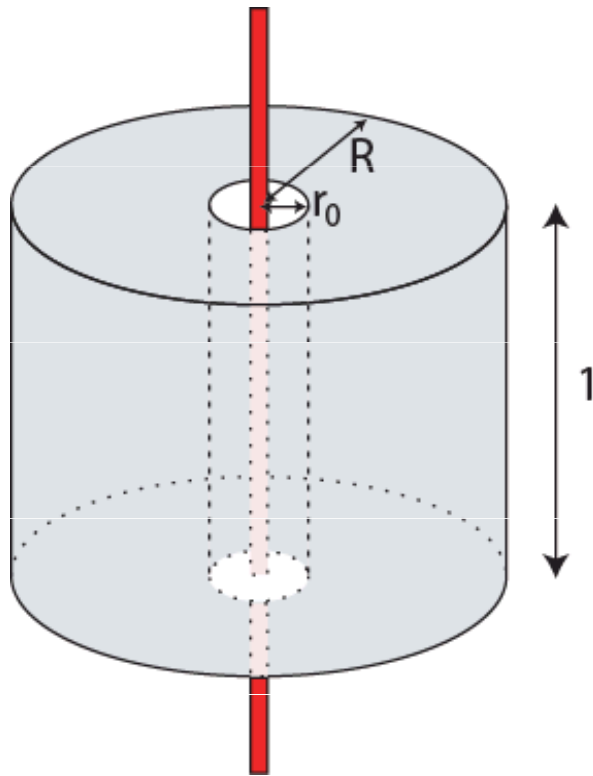
$$\vec{b} = [b00]$$

Kartézské souřadnice, kartézské složky

$\vec{u}$	$u_1 = \frac{b}{2\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{x_2}{x_1} + \frac{1}{2(1-\nu)} \frac{x_1 x_2}{x_1^2 + x_2^2} \right]$ $u_2 = -\frac{b}{8\pi(1-\nu)} \left[ (1-2\nu) \ln(x_1^2 + x_2^2) + \frac{x_1^2 - x_2^2}{x_1^2 + x_2^2} \right]$ $u_3 = 0$
$\varepsilon$	$\varepsilon_{11} = -\frac{b}{2\pi} \left[ \frac{x_2}{x_1^2 + x_2^2} + \frac{1}{2(1-\nu)} \frac{x_2(x_1^2 - x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2} \right]$ $\varepsilon_{22} = -\frac{b}{4\pi(1-\nu)} \left[ (1-2\nu) \frac{x_2}{x_1^2 + x_2^2} - \frac{2x_1^2 x_2}{(x_1^2 + x_2^2)^2} \right]$ $\varepsilon_{33} = \varepsilon_{23} = \varepsilon_{13} = \varepsilon_{12} = 0$
$\sum \varepsilon_{ii}$	$\varepsilon_{ii} = -\frac{b}{2\pi} \frac{1-2\nu}{1-\nu} \frac{x_2}{x_1^2 + x_2^2}; \quad \varepsilon_{ii, \text{střední}} = 0$
$\sigma$	$\sigma_{11} = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x_2(3x_1^2 + x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$ $\sigma_{22} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x_2(x_1^2 - x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$ $\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})$ $\sigma_{12} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x_1(x_1^2 - x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$ $\sigma_{23} = \sigma_{13} = 0$

$\nu$  - Poissonovo číslo

# ENERGIE DISLOKACE



$W$  = elastická energie v objemu v okolí dislokace  
mezi  $r_0$  a  $R$ , jednotková délka.

$$W_{\text{total}} = W_{\text{jádro}} + W$$

$$W^{\text{šr}} = \frac{G b^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0} = \alpha G b^2$$

$$W^{\text{hr}} = \frac{1}{1-\nu} \frac{G b^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0}$$

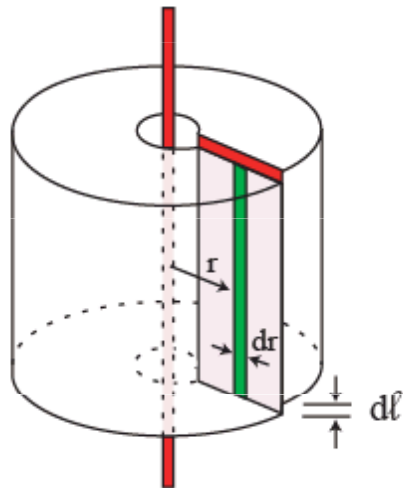
Hodnota  $\alpha$  ?

$$r_0 \sim |b| \sim 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$R \sim 10^3 b \sim 0,3 \mu\text{m} \Rightarrow \alpha = 0,55$$

$$R \sim 10^5 b \sim 30 \mu\text{m} \Rightarrow \alpha = 0,92$$

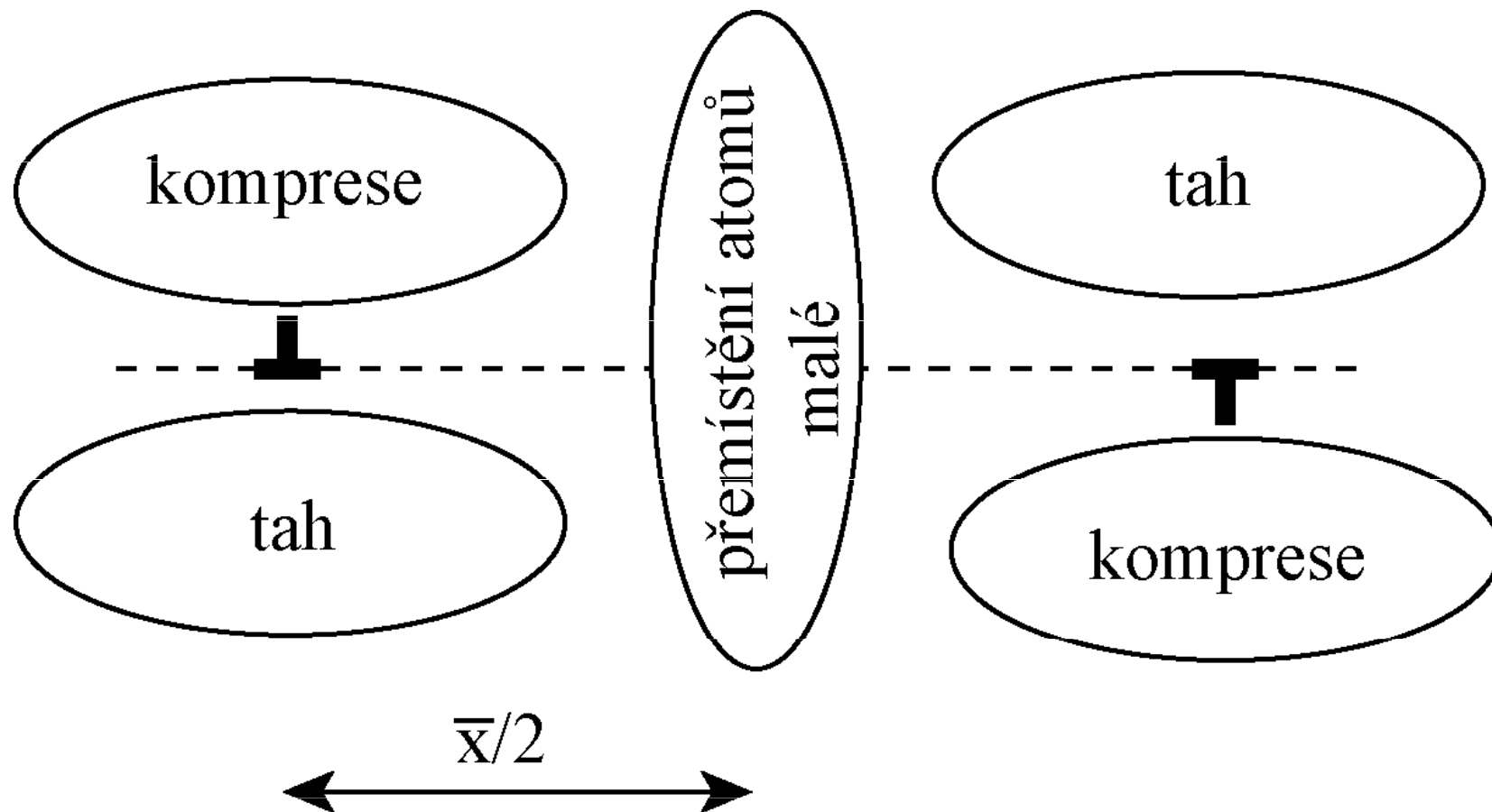
$$\alpha = 0,5 - 1$$



$$\sigma_{3\theta} = \frac{G b}{2\pi r}$$

$$dW = \sigma_{3\theta} dS \cdot dl = \frac{G l}{2\pi r} 1 \cdot dr dl$$

$$W = \frac{G}{2\pi} \int_0^b \int_{r_0}^R \frac{l}{r} dl dr = \frac{G b^2}{4\pi} \int_{r_0}^R \frac{dr}{r}$$



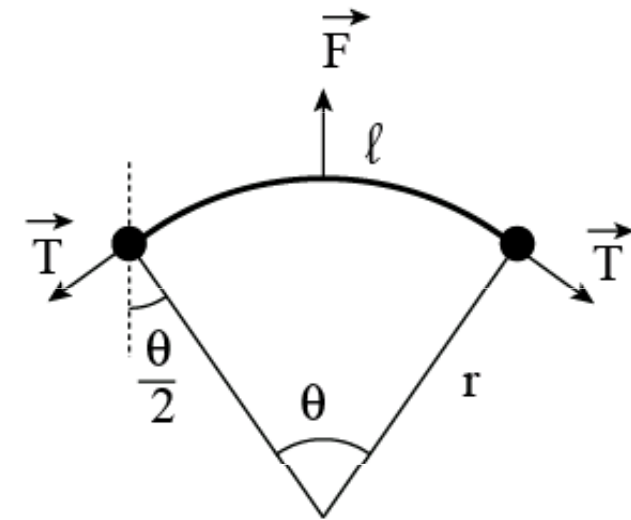
# TAH V DISLOKAČNÍ ČÁŘE

ANALOGIE :

$p_0$



mýdlová bublina :  
povrchové napětí  $\gamma$



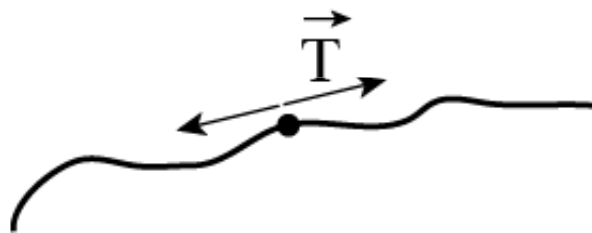
Dislokace : *tah v d. čáře*  $\vec{T}$  [ $\text{Jm}^{-1}$ ]

$F = 2 T \sin(\theta/2)$  rovnováha sil

$$\vec{T} = \frac{dE}{d\ell} \frac{\vec{d}}{|\vec{d}|} = W \frac{\vec{d}}{|\vec{d}|} = \alpha G b^2$$

$$F = F_g \ell = \tau b \ell = 2 \alpha G b^2 (\theta/2)$$

$$\tau = \frac{\alpha G b}{r}$$



$\vec{T}$  : - síla, která je potřeba k "udržení" dislokace po jejím fiktivním přestřižení  
- síla, která se snaží dislokace udržovat přímé

# HUSTOTA DISLOKACÍ

$$\rho = \frac{\Sigma l_i}{V} \quad [\rho] = [m^{-2}], \quad [cm^{-2}]$$

Řádové hodnoty  $\rho$  [ $m^{-2}$ ]:

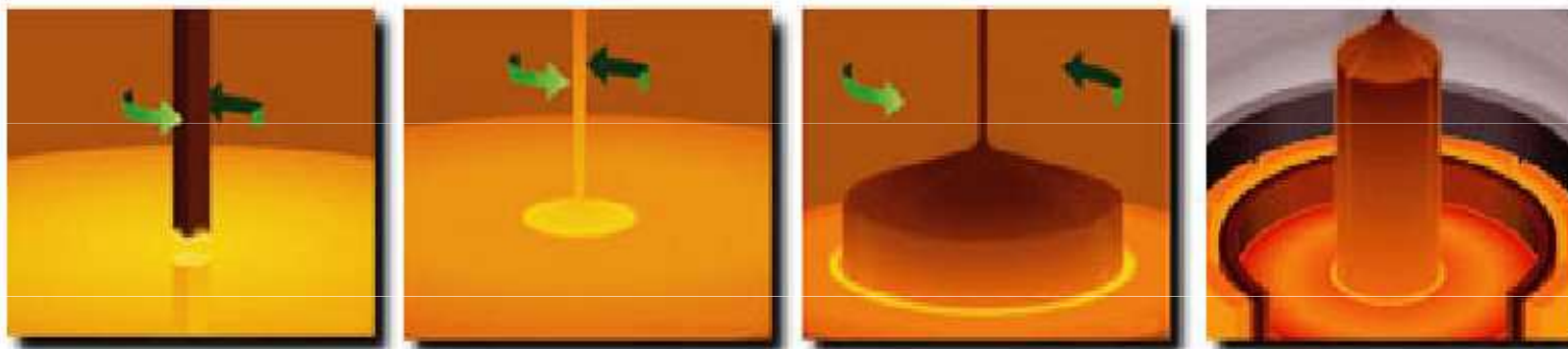
- KOVY :
  - vyžíhaný  $10^9 - 10^{11}$
  - středně deform.  $10^{12} - 10^{14}$
  - velká pl. def.  $10^{15} - 10^{17}$
  - whiskery  $\sim 0$

$m^{-2}$

Vzdálenost Země-Slunce:

$1,5 \cdot 10^{11}$  m

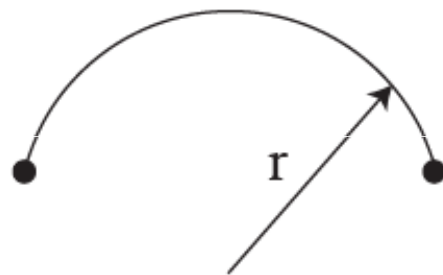
- POLOVODIČE :  $0 - 10^7 m^{-2}$



Metoda Czochralského pro přípravu monokrystalu Si bez dislokací.

# PŘÍKLADY

- Napětí potřebné pro zakřivení dislokace :



$$\tau = \alpha \frac{G b}{r} \sim \frac{G b}{r}$$

$$G (\text{Al}) = 27,7 \text{ GPa}; G (\text{Fe}) = 84,7 \text{ GPa}$$

r	$\tau$ , Al	$\tau$ , Fe
5 b	5,5 GPa	17 GPa
100 b	270 MPa	847 MPa
10 000 b	2,7 MPa	8,47 MPa

- Elastická energie

$$\text{energie dislokace: } W \sim 0,5 G b^2$$

$$a (\text{Al}) = 0.404 \text{ nm}; a (\text{Fe}) = 0.286 \text{ nm}$$

$\rho$ [ $\text{m}^{-2}$ ]	E (Al) [J]	E (Fe) [J]
1	$1,13 \times 10^{-9}$	$2,60 \times 10^{-9}$
$10^{13}$	$1,13 \times 10^4$	$2,60 \times 10^4$
$10^{16}$	$1,13 \times 10^6$	$2,60 \times 10^6$

$$\text{Specifické teplo } \text{Al} = 0,897 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Fe} = 0,450 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{hustota } \text{Al} = 2700 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\text{Fe} = 7870 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\Delta T (\text{Al}) = 0,46 \text{ K} \quad \Delta T (\text{Fe}) = 0,73 \text{ K}$$



# METODY POZOROVÁNÍ DISLOKACÍ

- Leptové důlky

$$\rho = 0 - 10^{11} \text{ m}^{-2}$$

pozorování pouze na povrchu vyleštěného krystalu  
neposkytuje informace o  $\vec{b}$  ani  $\vec{d}$

- Topographie rtg záření

$$\rho = 0 - 10^8 \text{ m}^{-2}$$

pozorování prozářením objemu ( $t = 1 \text{ mm}$ )  
lze zjistit  $\vec{b}$  a  $\vec{d}$

- Transmisní elektronová mikroskopie

$$\rho = 10^{10} - 10^{16} \text{ m}^{-2}$$

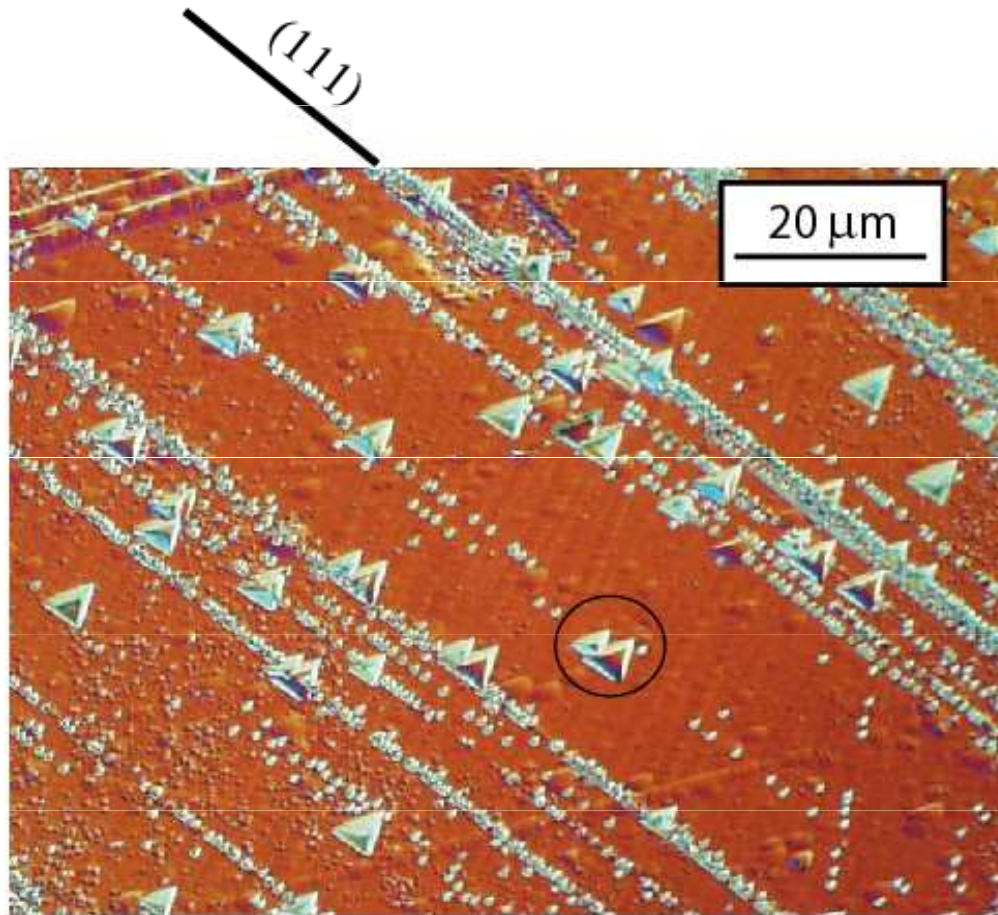
pozorování dislokací v tenkých fóliích ( $t = 100 \text{ nm}$ )  
lze zjistit  $\vec{b}$  a  $\vec{d}$

Dislokace neviditelné :

$$\vec{g} \cdot \vec{b} = 0$$

# LEPTÁNÍ POVRCHU

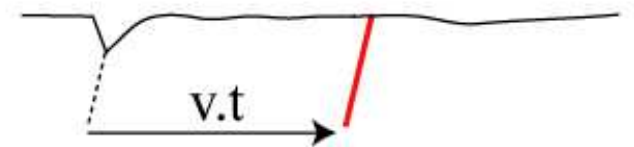
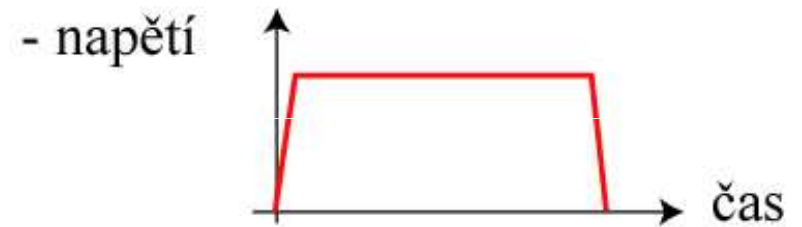
- lze odhadnout skluzové roviny



$\vec{b} = [101]$

( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ )

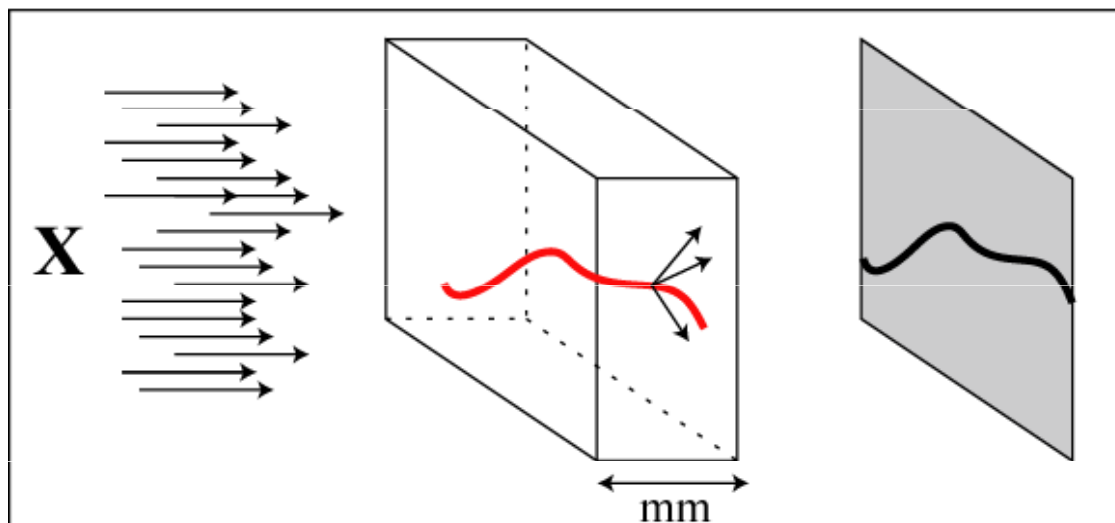
- měření rychlosti pohybu dislokací:  
- 1. naleptání



- 2. naleptání

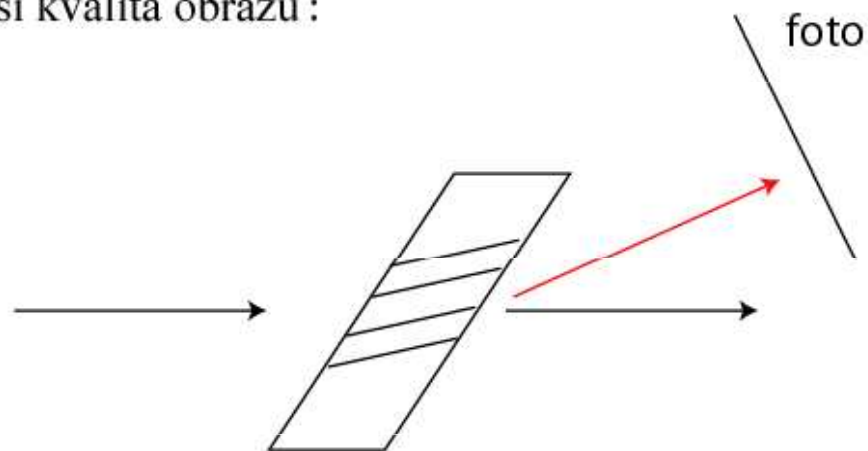


# TOPOGRAFIE RTG ZÁŘENÍ



Možné, ale kontrast není kvalitní

Lepší kvalita obrazu :



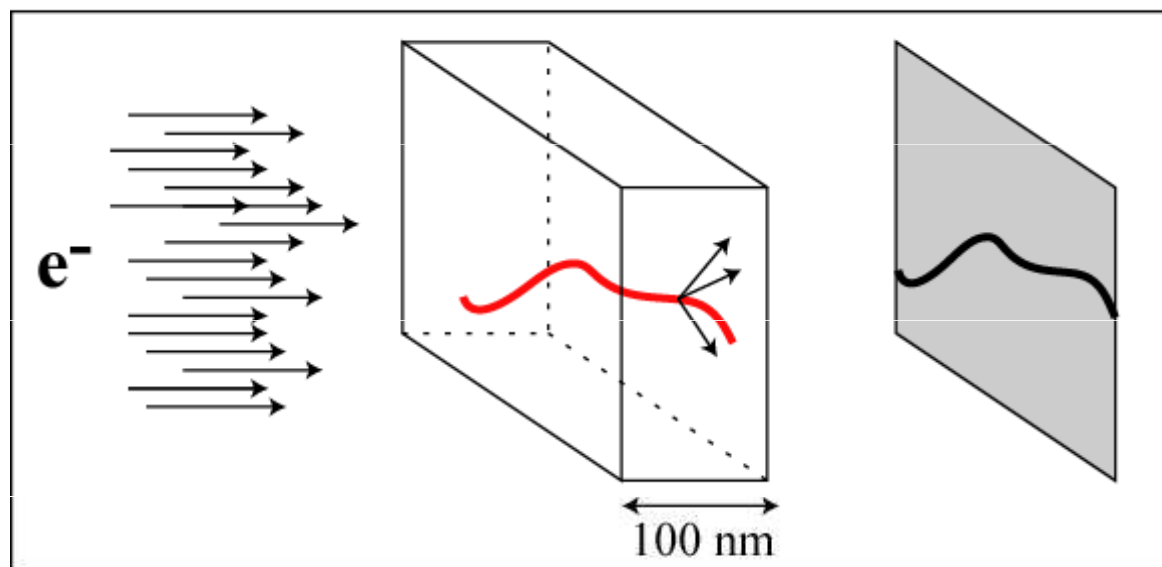
Zdroje rtg :

- labo : anoda Cu bombardovaná rychlými elektrony (rentgenka)
- synchrotron

ESRF Grenoble (The European Synchrotron Radiation Facility, [www.esrf.fr](http://www.esrf.fr))



# TRANSMISNÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE



Jeol 3000 :

- 300 kV

- rozlišení - mřížka 0.10 nm

- rozlišení bodové 0.17 nm



# INTERAKCE DISLOKACÍ

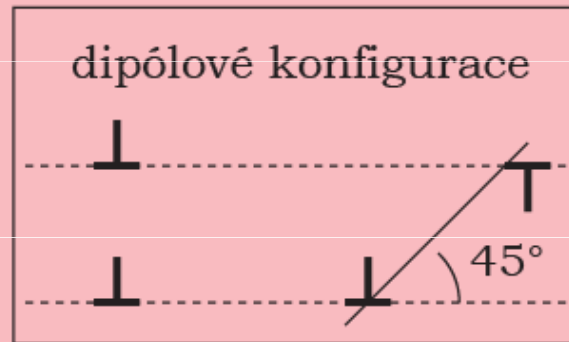
Dvě rovnoběžné dislokace ve stejné skluzové rovině

$b_1 b_2 > 0$  ... odpuzují se  
 $b_1 b_2 < 0$  ... přitahují se

Dvě rovnoběžné šroubové d. na rovnoběžných rovinách



Dvě rovnoběžné hranové d. na rovnoběžných rovinách,  $\vec{b}_1 \vec{b}_2$  rovnoběžné

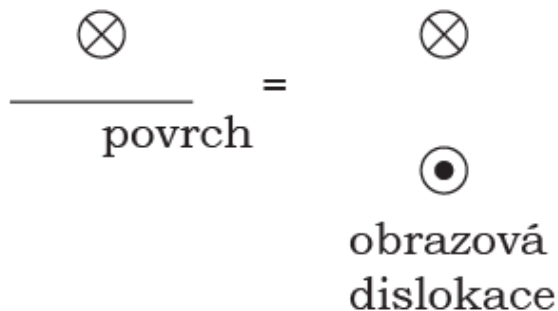


Dvě rovnoběžné hranové d. na rovnoběžných rovinách,  $\vec{b}_1 \vec{b}_2$  kolmé

Rovnoběžná šroubová d. a hranová d.

$$F_g = 0$$

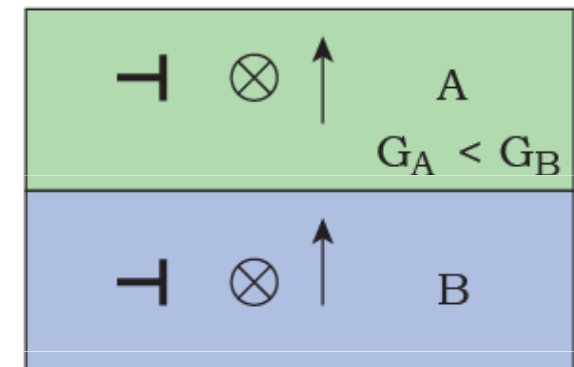
Šroubová dislokace a povrch



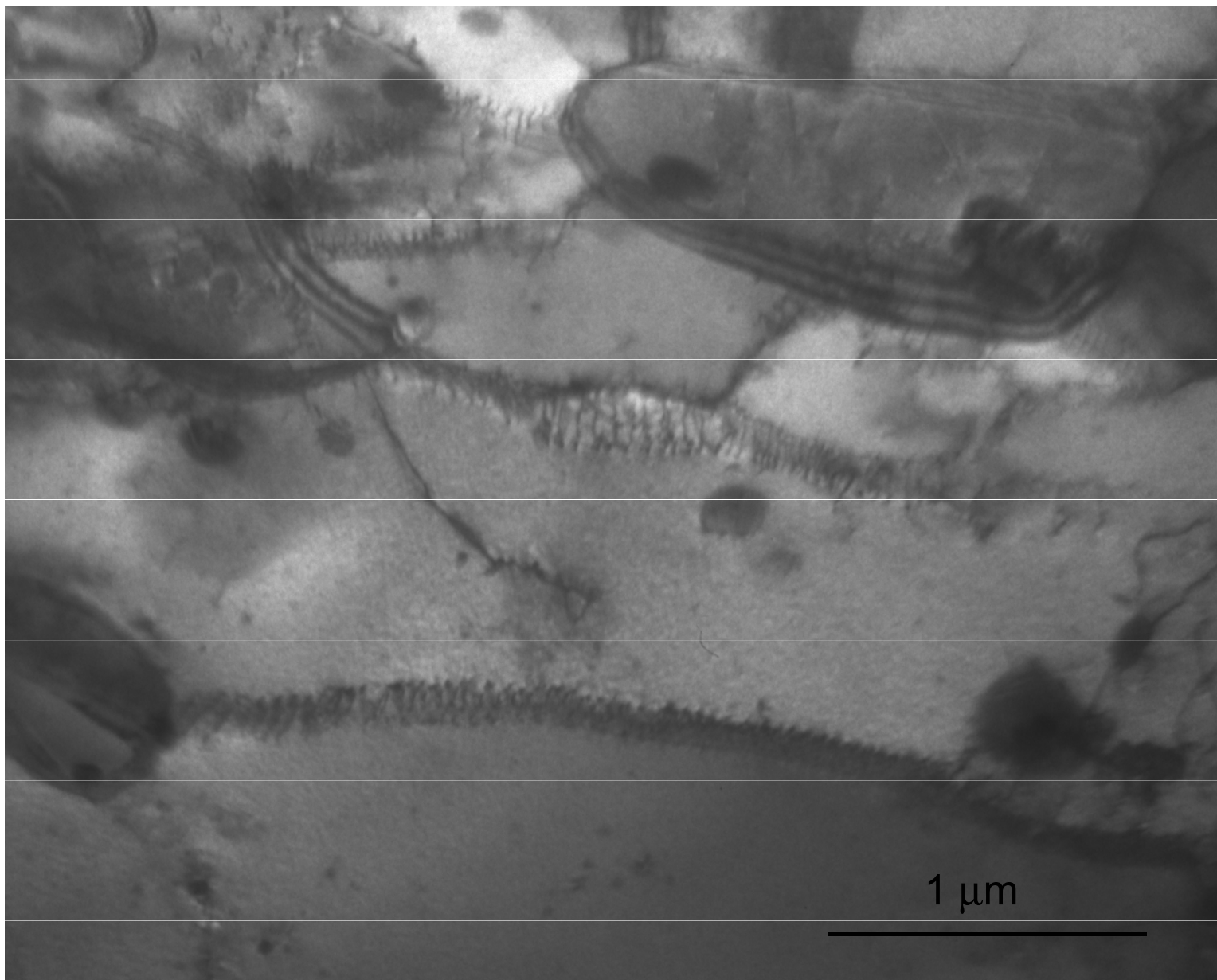
Hranová dislokace a povrch

přitahována k povrchu

Dislokace a rozhraní



**Nízkoúhlové hranice – sklonová hranice  
(tilt boundary)**



## Energie hranice zrna

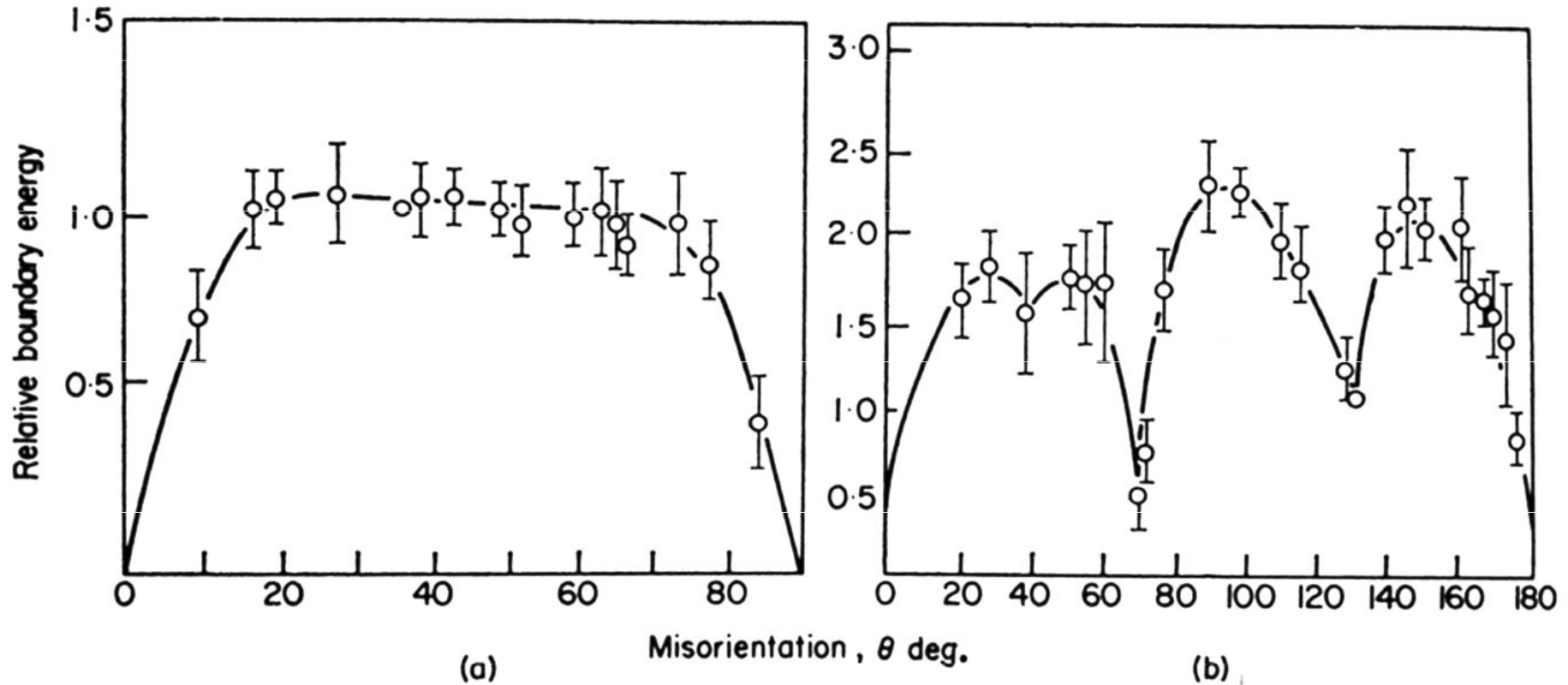
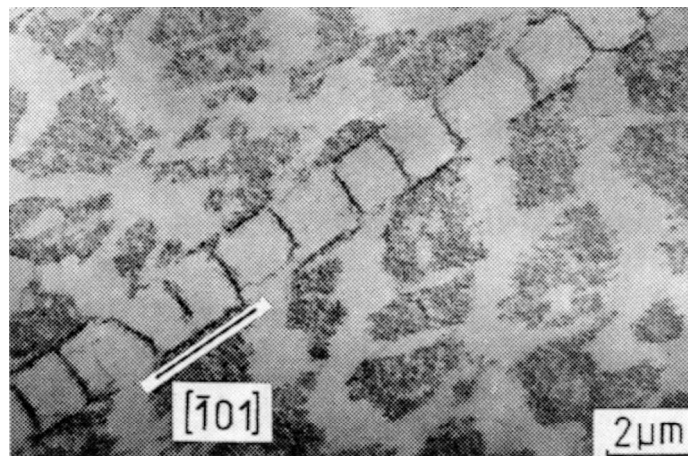
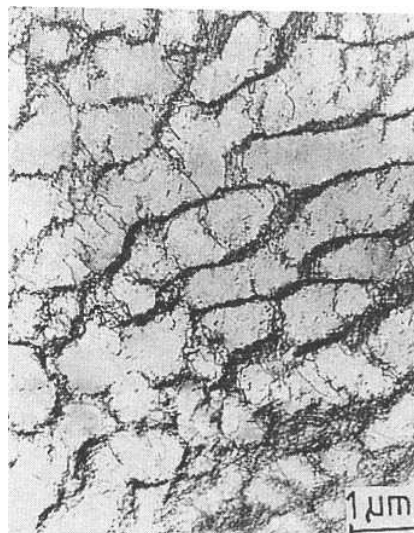
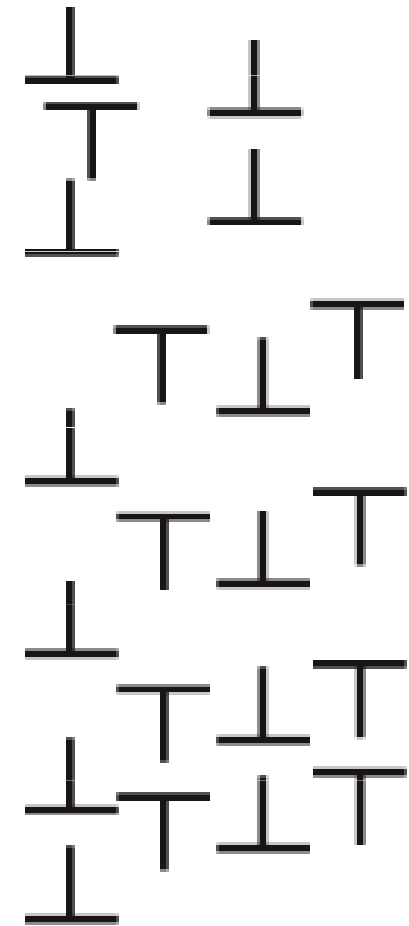
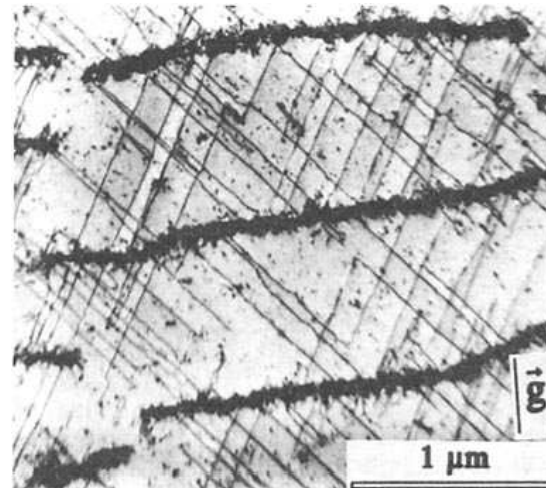
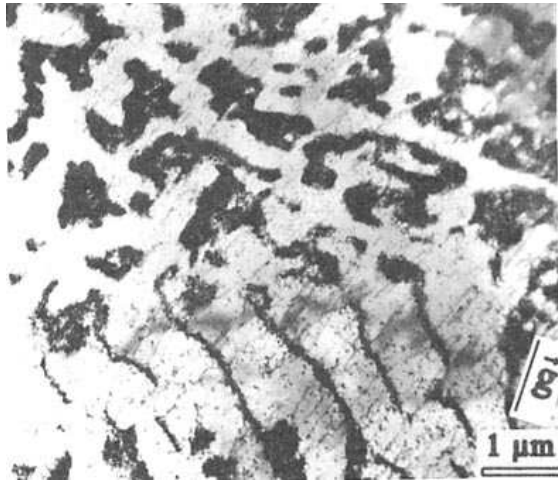


Fig. 3.13 Measured grain boundary energies for symmetric tilt boundaries in Al (a) when the rotation axis is parallel to  $\langle 100 \rangle$ , (b) when the rotation axis is parallel to  $\langle 110 \rangle$ . (After G. Hasson and C. Goux, *Scripta Metallurgica*, 5 (1971) 889.)

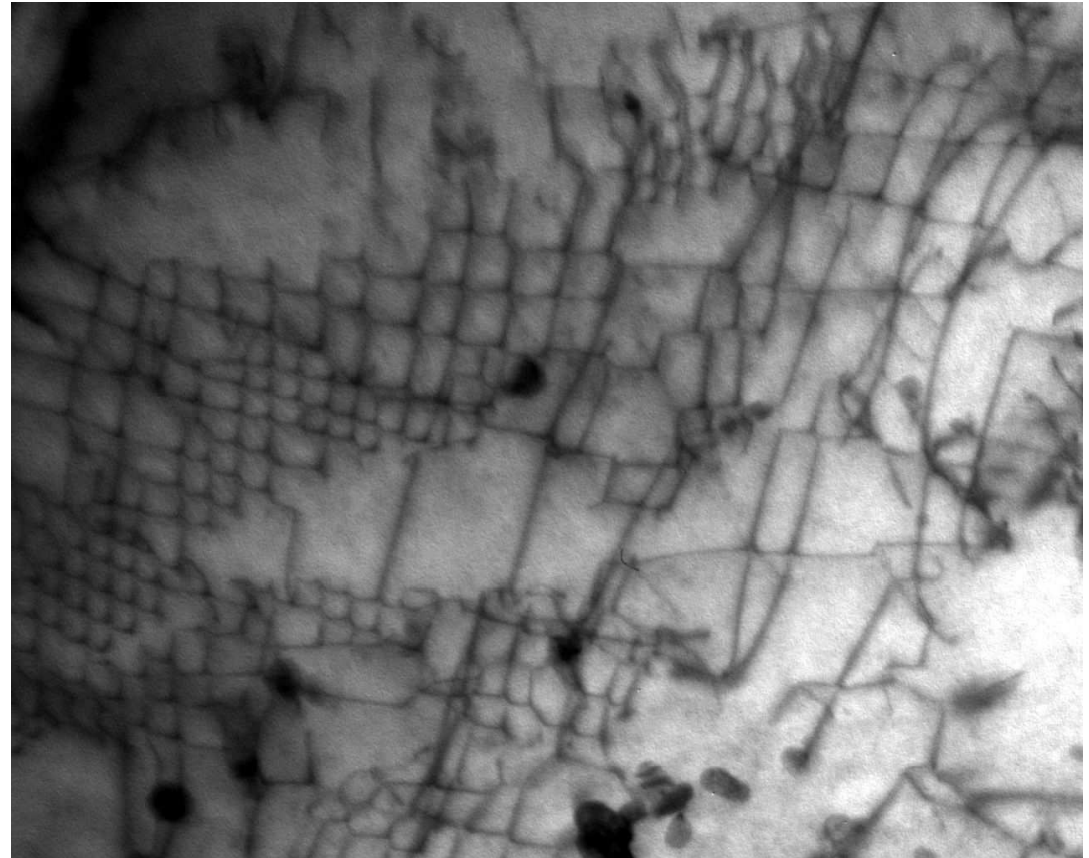
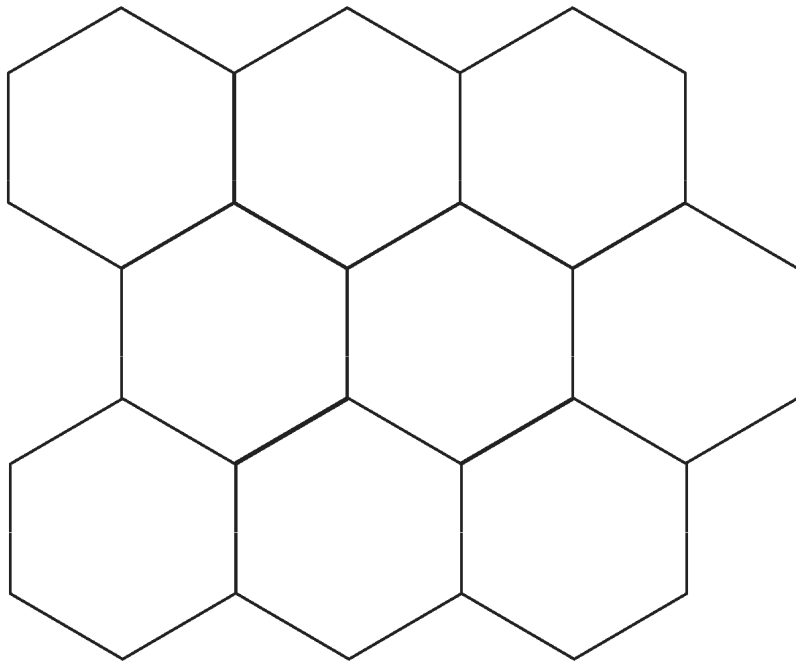
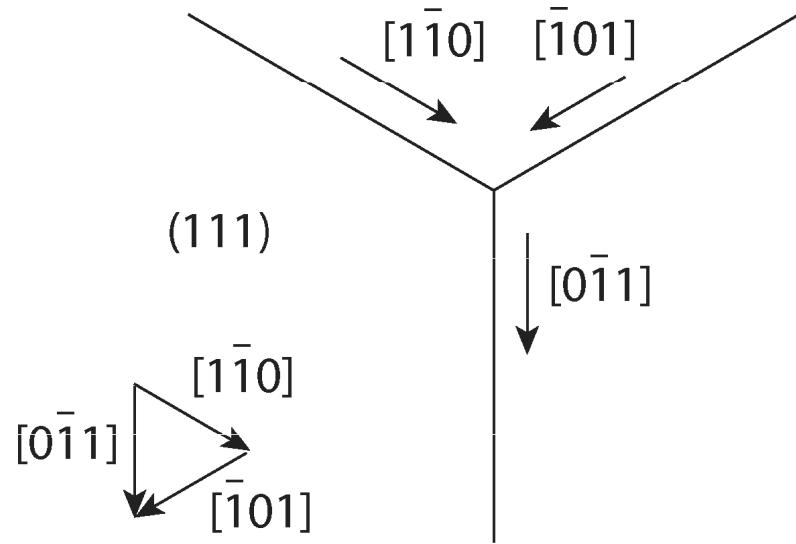
# DISLOKAČNÍ MIKROSTRUKTURA PO ÚNAVĚ:

dobře definované 3D uspořádání



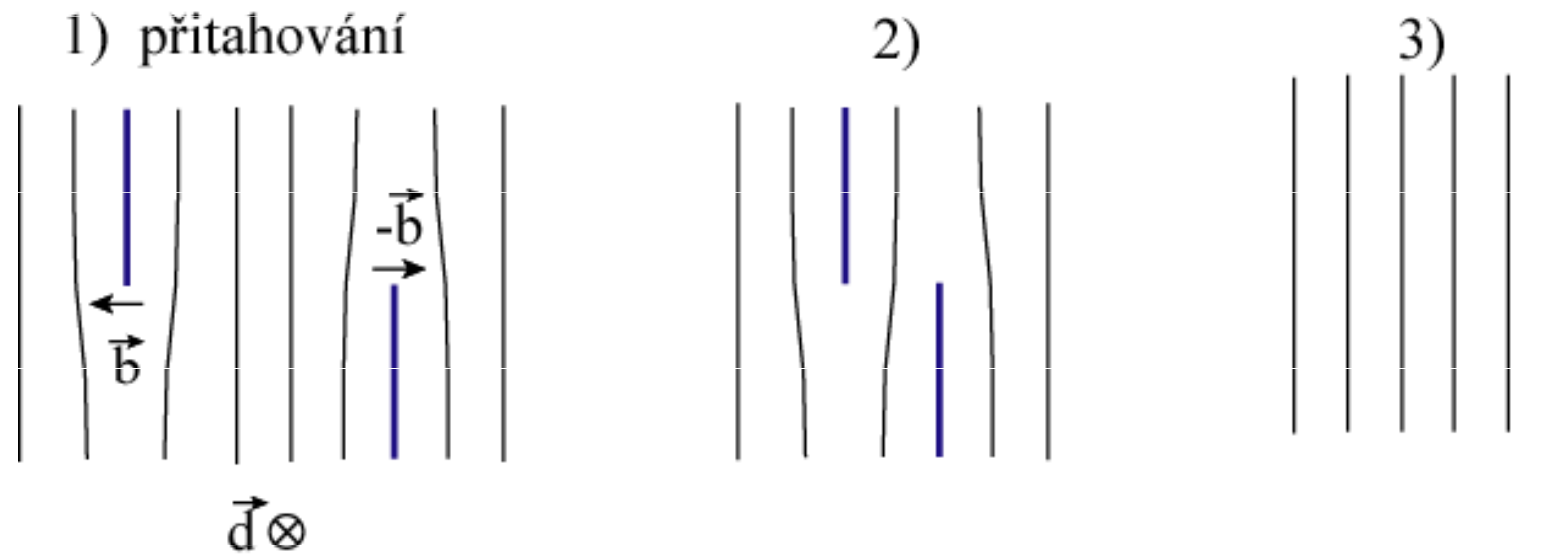


# Nízkoúhlové hranice – zkrutová hranice tvořená šroubovými dislokacemi (twist boundary)



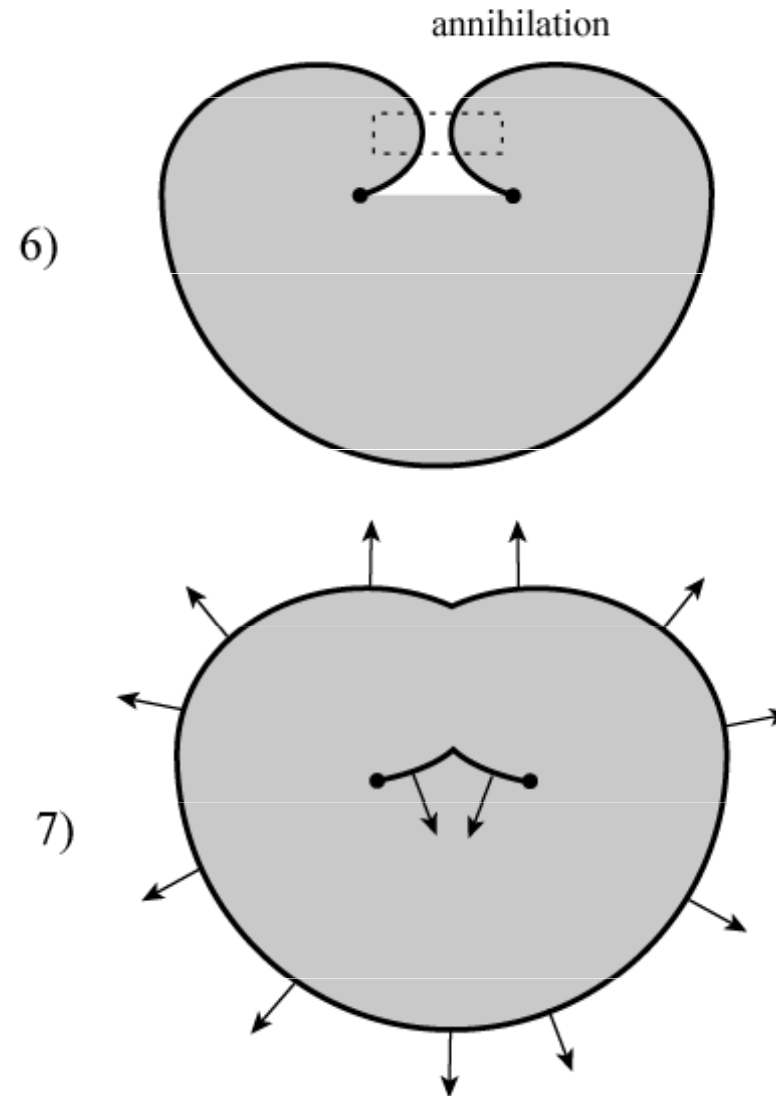
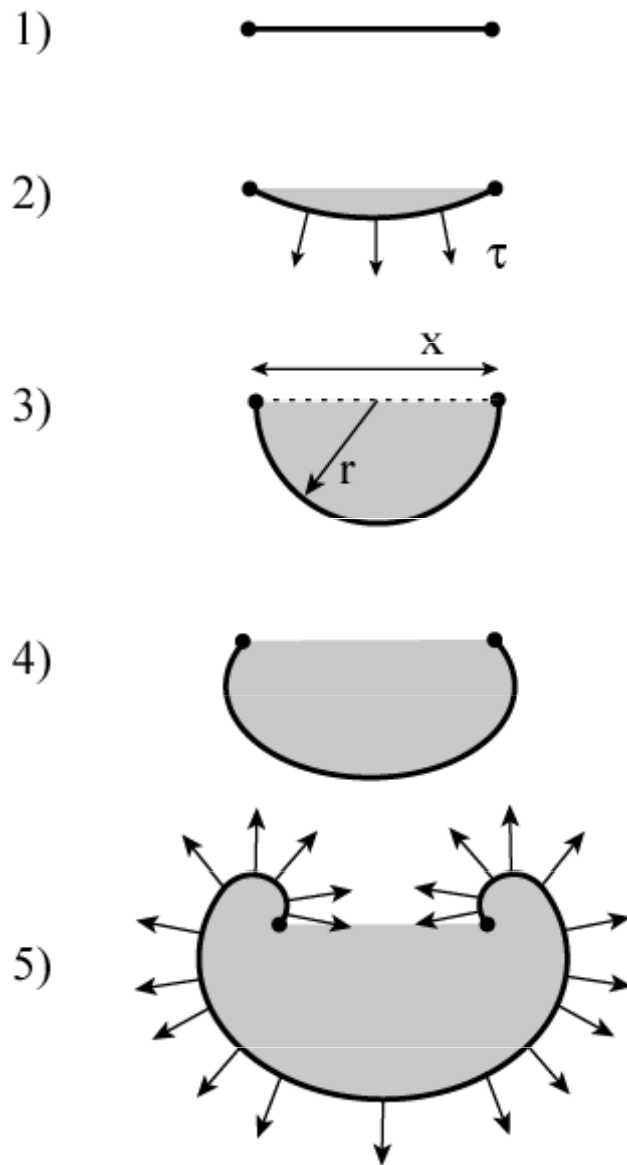
# ANIHILACE x MULTIPLIKACE DISLOKACÍ

Anihilace :  $b + (-b) = 0$



# ANIHILACE x MULTIPLIKACE DISLOKACÍ

Frank-Readův zdroj



# PŘÍČNÝ SKLUZ (zjednodušená verze)

