



# Materiály pre mechatroniku

Pre študijné zameranie:

Mechatronika a Mechatronika cestných motorových vozidiel

doc. Ing. Dušan Maga, PhD.



# Literatúra

- Maga – Faitová: Materiály pre mechatroniku, FM TnUAD
- Faitová – Maga: Vlastnosti materiálov a ich skúšanie, FM TnUAD
- Benda – Hanajíková: Základy elektrotechniky, Alfa Bratislava 1984
- Pokluda – Kroupa – Obdržálek: Mechanické vlastnosti a struktura pevných látok – kovy – keramika – plasty, VÚT Brno 1994,  
ISBN 80-214-0575-9,
- Formánek – Mikloš – Poljak: Materiály a technológie II, Alfa Bratislava 1986
- Puškár – Michel' – Pulc: Náuka o materiáli 1, Alfa Bratislava



# Program prednášok

- Úvod
- Polovodiče
- Izolanty
- Štruktúra pevných látok
- Vlastnosti kovov a ich zliatin
- Keramika,
- Plasty
- Skúšanie materiálov
- ...

## Podmienky pre „skúšku“



- Zápočet (podmienky udelenia zápočtu upresnia cvičiaci),
- Absolvovanie dvoch testov počas semestra,
- Zúčastnenie sa na hodnotení kvality pedagogického procesu,
- Ďalšie podmienky, okruhy tém, postup absolvovania na: [www.fm.tnuni.sk](http://www.fm.tnuni.sk), resp. [yhman.tnuni.sk/~maga](http://yhman.tnuni.sk/~maga)





# Program cvičení

- Elektrické – väčšinou polovodiče
- Mechanické – skúšky materiálov a pod.

Podrobnejšie upresnia cvičiaci,

Podmienky získania zápočtu: upresnia  
cvičiaci

# ÚVOD – Stavba atómu



John Dalton 1766 - 1844

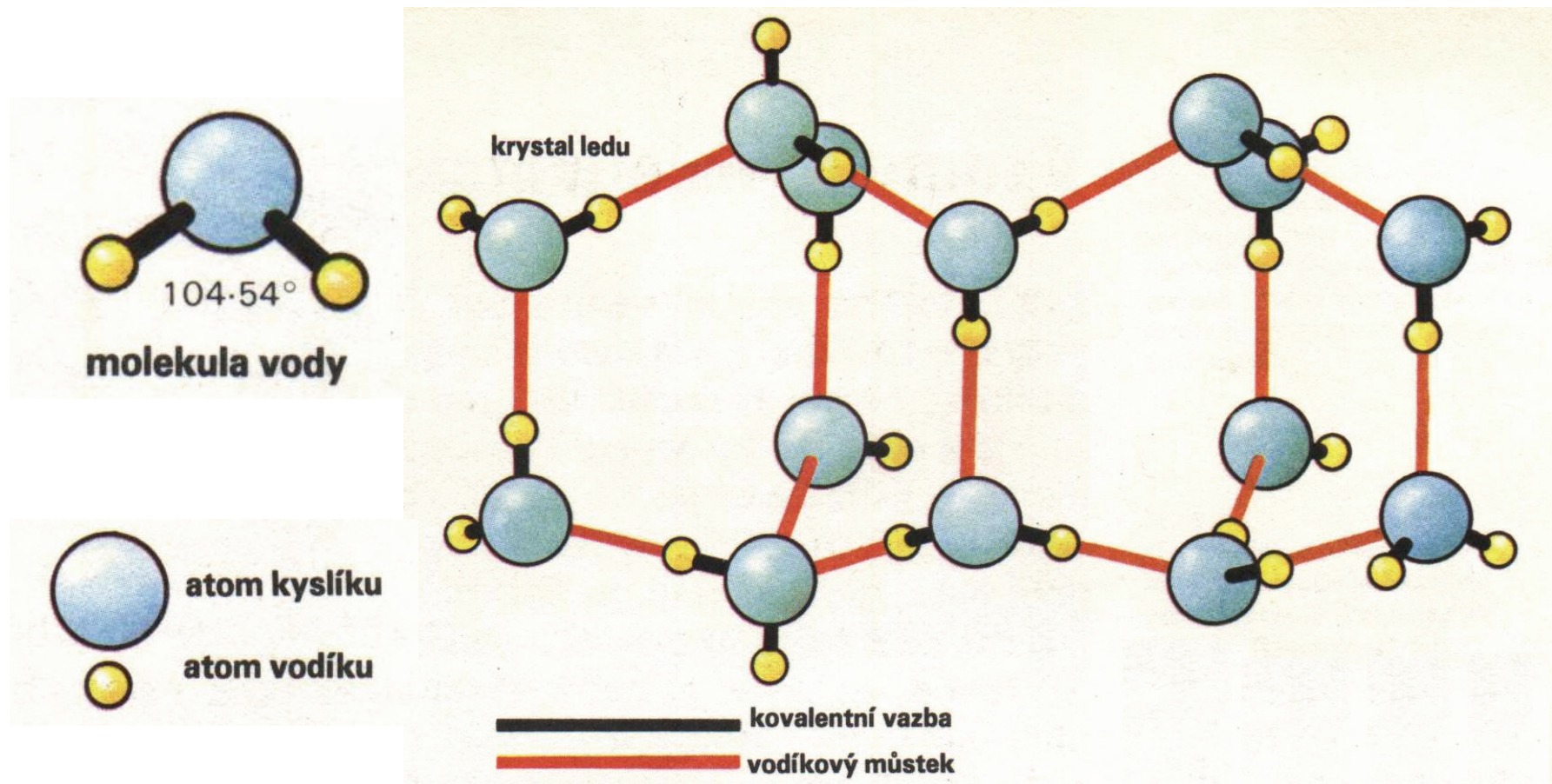
ELEMENTS

	Hydrogen	1		Strontian	46
	Azote	5		Barytes	68
	Carbon	5		Iron	50
	Oxygen	7		Zinc	56
	Phosphorus	9		Copper	56
	Sulphur	13		Lead	90
	Magnesia	20		Silver	190
	Lime	24		Gold	190
	Soda	28		Platina	190
	Potash	42		Mercury	167

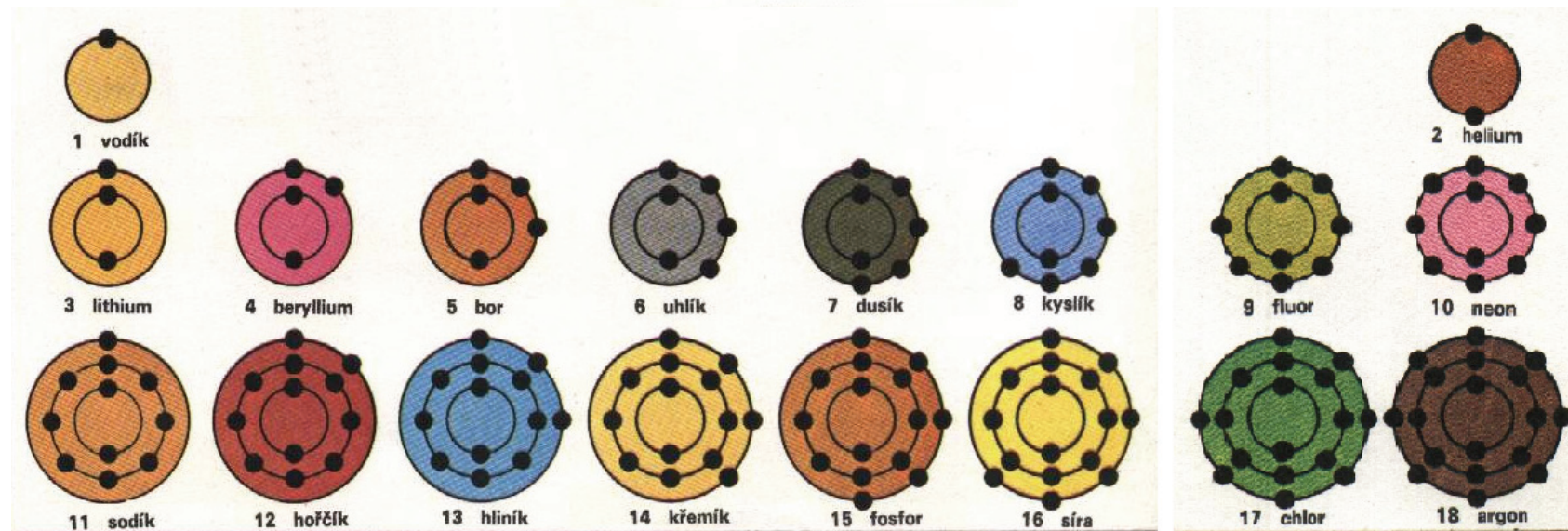


# ÚVOD – Stavba atómu

- John Dalton + Robert Brown (škótsky botanik) =  
základy atómovej teórie (atomy, molekuly)



# ÚVOD – Stavba atómu





# ÚVOD – Stavba atómu





# ÚVOD

- 3 skupenstvá:
  - pevné  $10^{22} - 10^{23}$  atómov na  $1 \text{ cm}^3$
  - kvapalné  $10^{22} - 10^{23}$  atómov na  $1 \text{ cm}^3$
  - plynné  $10^{19}$  atómov na  $1 \text{ cm}^3$
  - (plazma)
- (ďalej len látky pevné!)

# ÚVOD



- delenie podľa:
  - chémie:
    - organické
    - anorganické
  - fyziky:
    - kryštalické
    - amorfné
  - iné oblasti vedy a výskumu...



# 1 Polovodiče

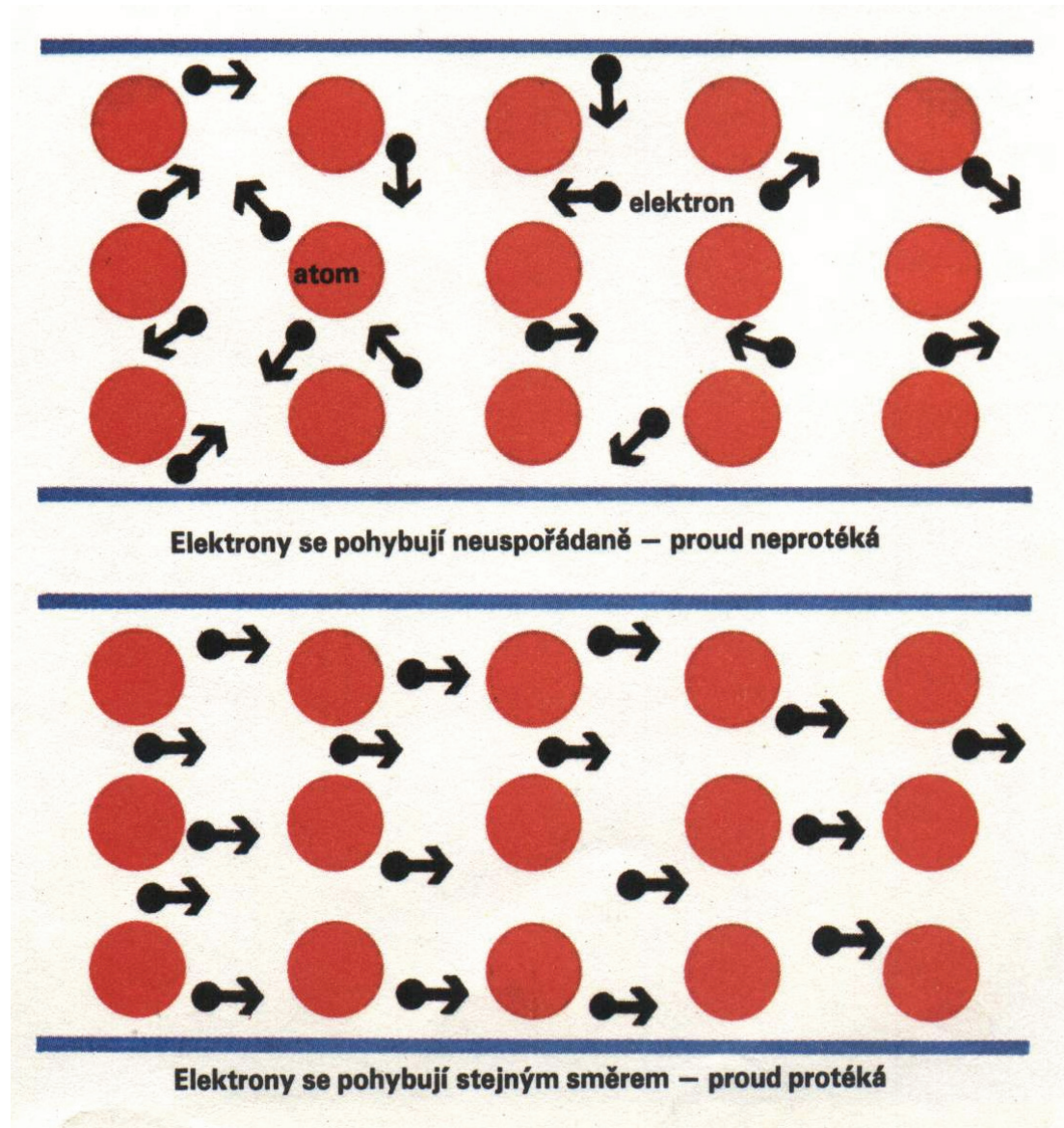


1.1 Úvod

1.2 Polovodivé materiály

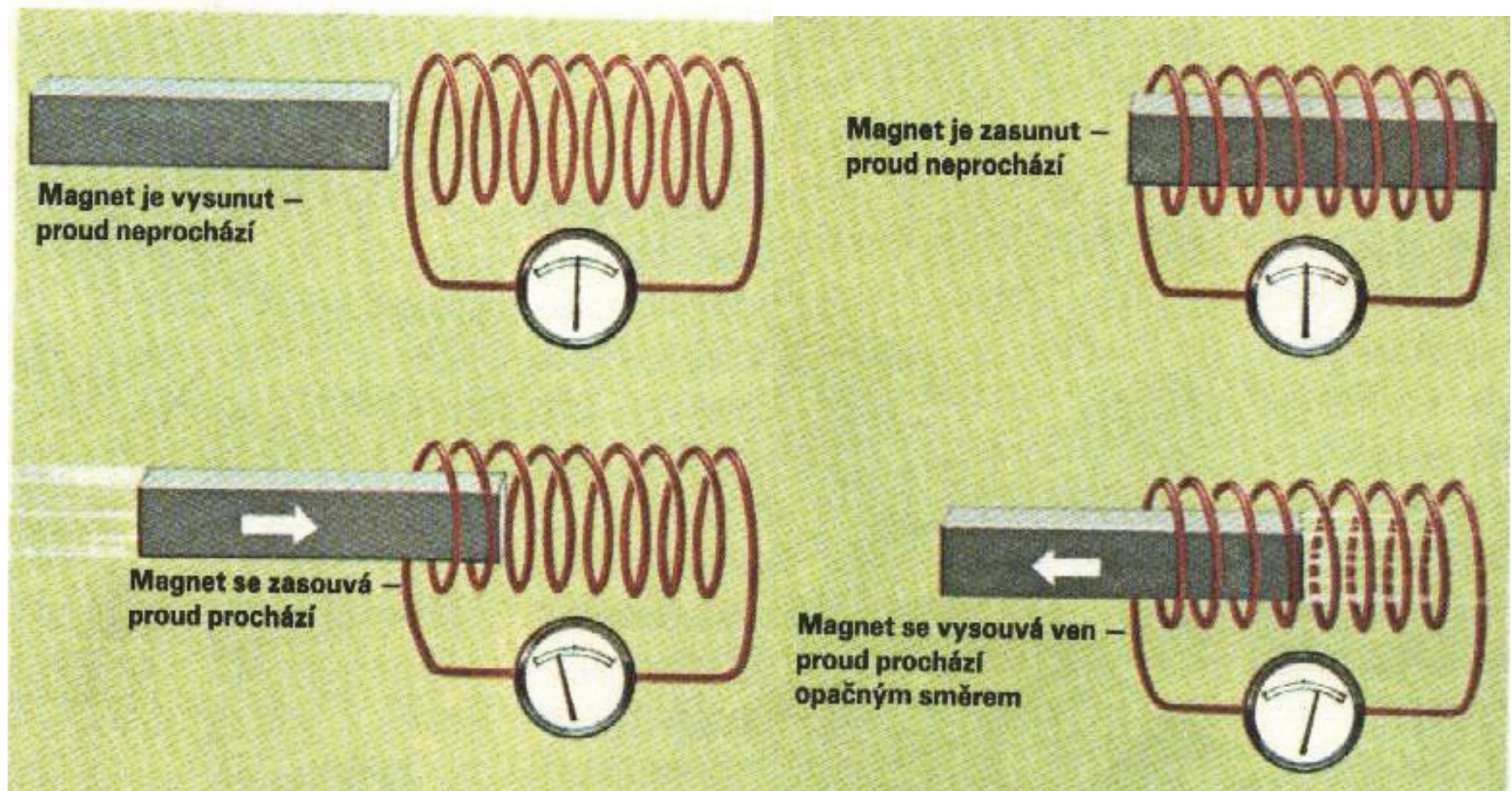
1.3 Technológie výroby

# 1.1 Úvod





# 1.1 Úvod





# 1.1 Úvod

Elektrický náboj → elektrón (obalová časť atómov)

$$e = - 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C (Coulomb)} = \text{A} \cdot \text{s}$$

$$m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg (pokoiová hmotnosť)}$$

1730 Duffay (správca francúzskej kráľovskej botanickej záhrady) objavil 2 druhy elektriny:

trenie skla (kladná)

trenie jantáru (záporná)

Jantár má rovnakú polaritu ako elektrón → elektrón je záporný → (jantár = elektrón po grécky)



# 1.1 Úvod

Elektrický prúd:

$$I = \Delta Q / \Delta t$$

Náboj, ktorý určitým prierezom prejde za jednotku času. Fyzikálne kladný zmysel prúdu → smer pohybu kladných nábojov





## 1.1 Úvod

Vo vákuu  $\rightarrow$  prúd 1 A  $\rightarrow$  cez prierez prejde každú sekundu  $1/1,602 \cdot 10^{-19} = 6,24 \cdot 10^{18}$  elektrónov

Vodiče: obsahujú slabo viazané elektróny, ktoré sa môžu voľne pohybovať  $\rightarrow$  elektrónový plyn. Tieto sa nazývajú vodivostné.

Sú to hlavne kovy  $\rightarrow$  meď  $\rightarrow 8,5 \cdot 10^{22}$  vodivostných elektrónov na  $m^3$ .



# 1.1 Úvod

Merná vodivosť (konduktivita)  $\sigma$ :

konštanta úmernosti medzi prúdovou hustotou a intenzitou elektrického poľa:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$

$$[\sigma] = \frac{[J]}{[E]} = \frac{A / m^2}{V / m} = \frac{A}{V \cdot m} = S \cdot m^{-1}$$





# 1.1 Úvod

Merný elektrický odpor:

$$\frac{1}{\sigma} = \rho$$

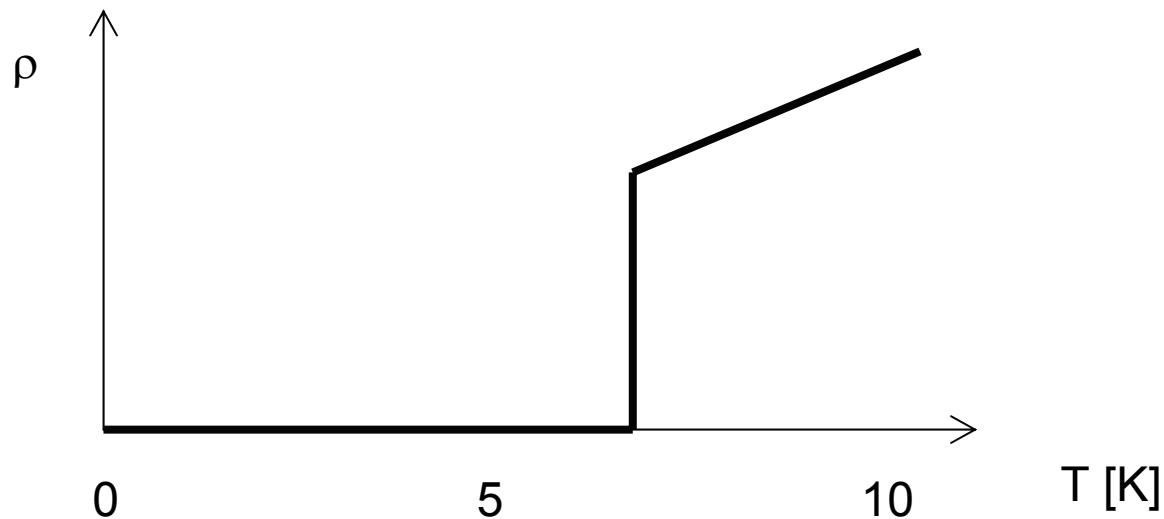
$$[\rho] = \frac{\text{m}}{\text{S}} = \Omega \cdot \text{m}$$

# 1.1 Úvod

Supravodivosť:

1911 H. Kamerling Onnes (Holandsko) → ortuť, olovo, cín

hlavne u kovov, pri extrémne nízkych teplotách (dosiahnuté odparovaním hélia)





# 1.1 Úvod

Polovodiče → látky, kde sa na prenose elektrického náboja zúčastňujú prevažne elektróny alebo diery, pričom ich konduktivita  $\sigma$  pri teplote 300K je rádovo  $10^5 - 10^{-11}$  S/m (izolanty  $10^{-7} - 10^{-18}$  S/m)



# 1.1 Úvod

## Rozdelenie polovodičov:

- Podľa štruktúry:
  - monokryštalické
  - polykryštalické
  - amorfné (sklovité)
- Podľa aplikačného tvaru:
  - objemové
  - vrstvové
- Podľa čistoty:
  - maximálne čisté
  - s riadeným druhom a množstvom prímiesí
- Podľa chemického zloženia:
  - chemické prvky
  - zlúčeniny

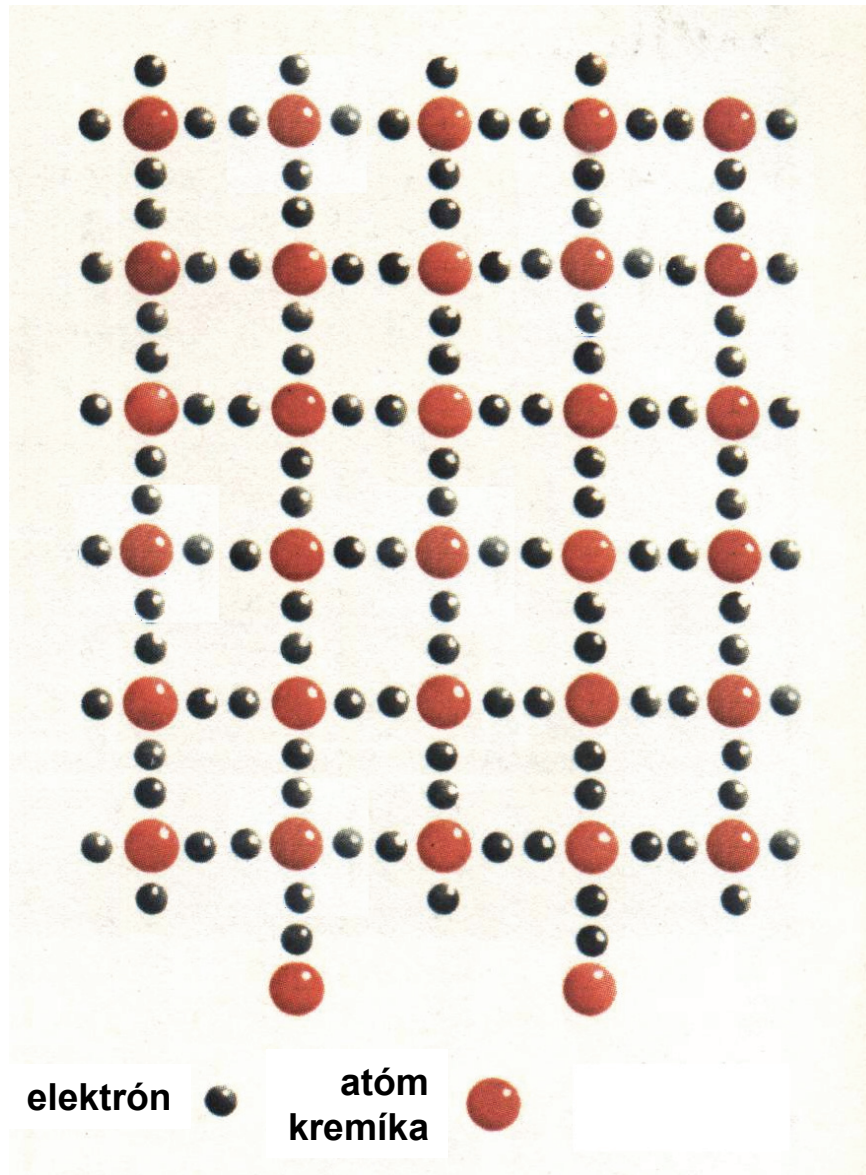


# 1.1 Úvod

- Vlastné polovodiče
- Nevlastné polovodiče
- Polovodiče v rovnovážnom stave
- Polovodiče v nerovnovážnom stave
- Elektrická vodivosť polovodičov
- Kontakt kovu a polovodiča
- PN priechod
- Základné fyzikálne vlastnosti polovodičov



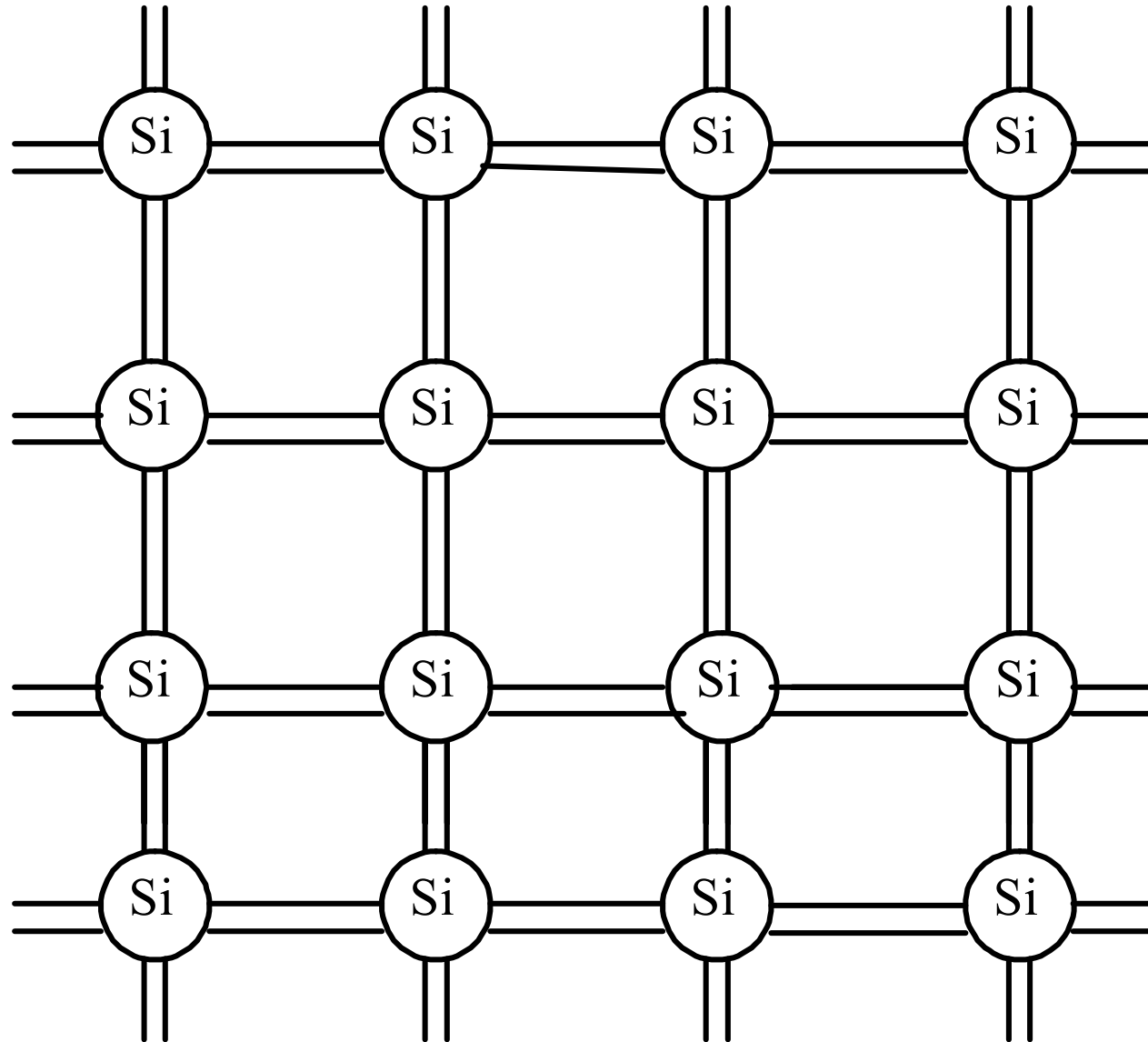
# 1.1 Úvod – Vlastné polovodiče



Neobsahuje poruchy v kryštalickej mriežke

zvyčajne: štvormocný kremík v diamantovej kryštalickej sústave

# 1.1 Úvod – Vlastné polovodiče







# 1.1 Úvod – Vlastné polovodiče

Ideálny stav → dokonale pravidelná mriežka, bez cudzích atómov, zároveň nechýba ani žiaden vlastný

Ak sú väzby neporušené → dokonalý izolant (pri  $0\text{K} = -273,16\text{ °C}$ ). Potom: tepelný pohyb → elektrón preskočí z valenčného pásma do vodivostného

Elektróny vo valenčnom pásme na seba pôsobia → na voľné miesto prejde elektrón zo susednej väzby → prázdne miesto (diera) sa pohybuje kryštálom

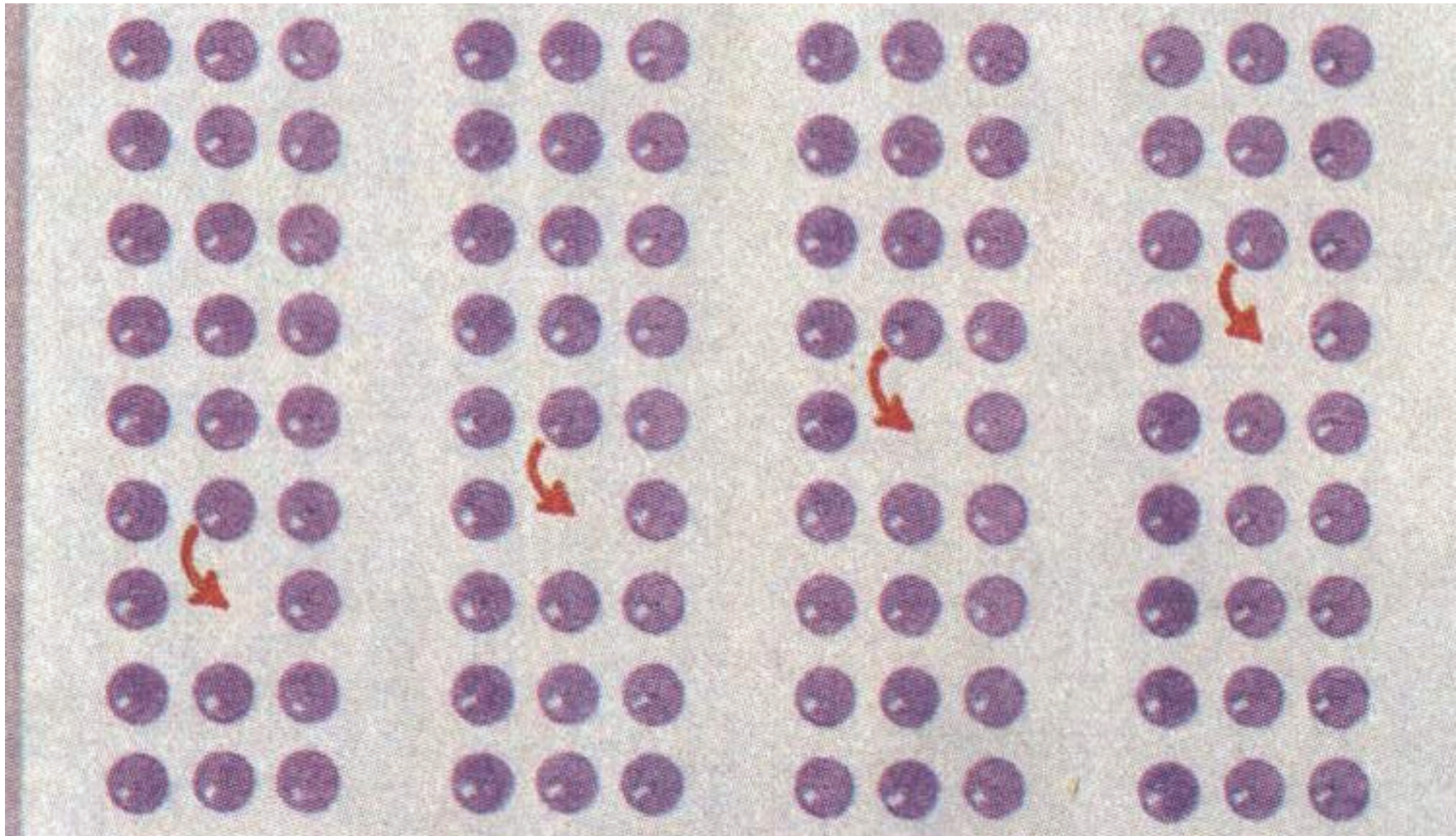


# 1.1 Úvod – Vlastné polovodiče

Valenčné elektróny: vonkajšie, energeticky najvyššie položené elektróny atómu prvku, kt. rozhodujúcou mierou ovplyvňujú ich schopnosť zlučovať sa s atómami iných prvkov. Môžu byť umiestnené na rozličných hladinách.

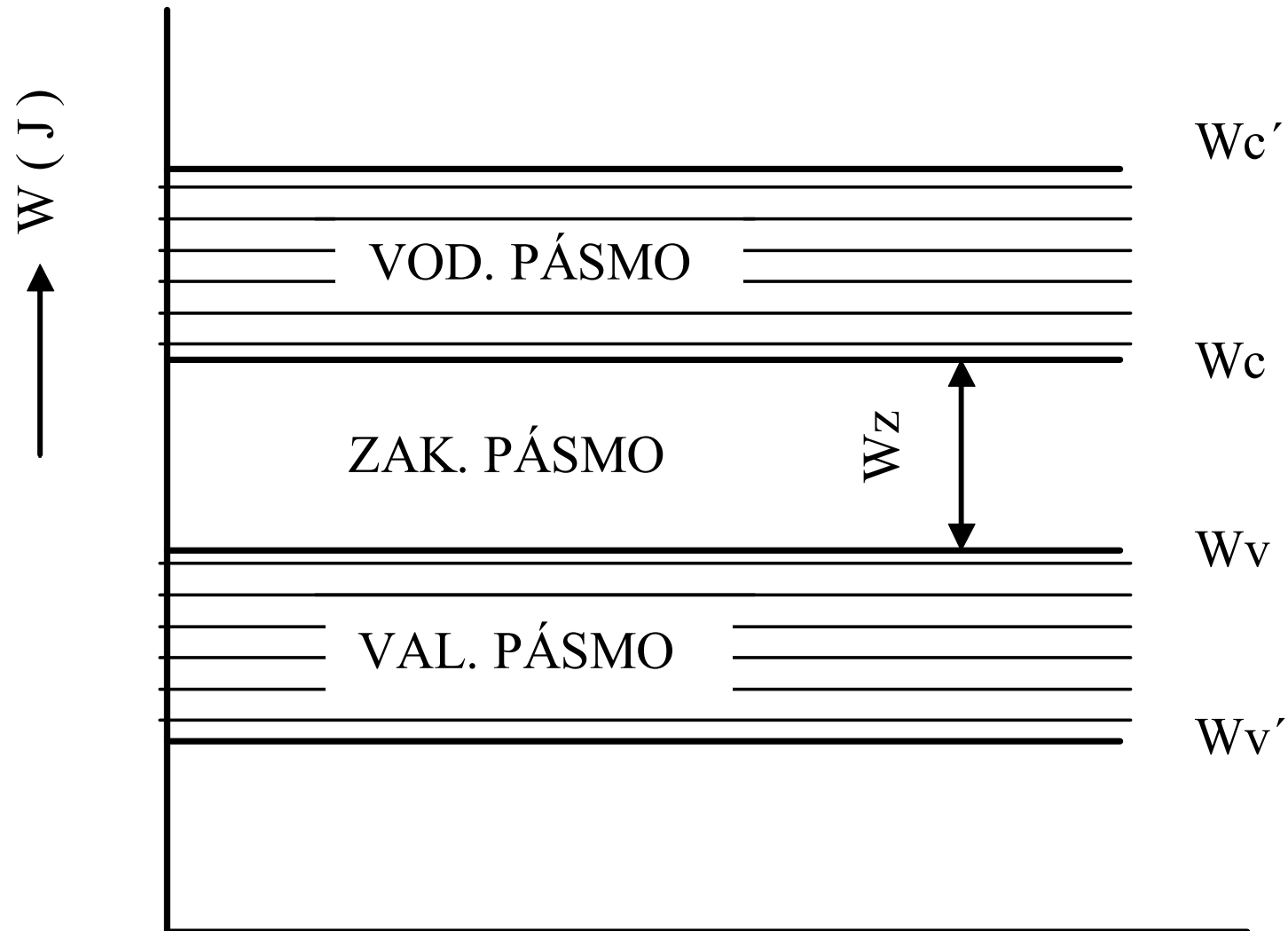
(Všeobecný encyklopedický slovník)

# 1.1 Úvod – Vlastné polovodiče





# 1.1 Úvod – Vlastné polovodiče



Kremík:  $\Delta W_z = W_c - W_v = 1,12 \text{ eV}$  (1,16 eV pri 0K)



# 1.1 Úvod – Vlastné polovodiče

Ak sa elektrón nezúčastňuje na kovalentnej väzbe → prebytok „+“ proti „-“ → kladne nabité centrum. Kryštál ako celok je i naďalej elektricky neutrálny:

$$n = p = n_i$$

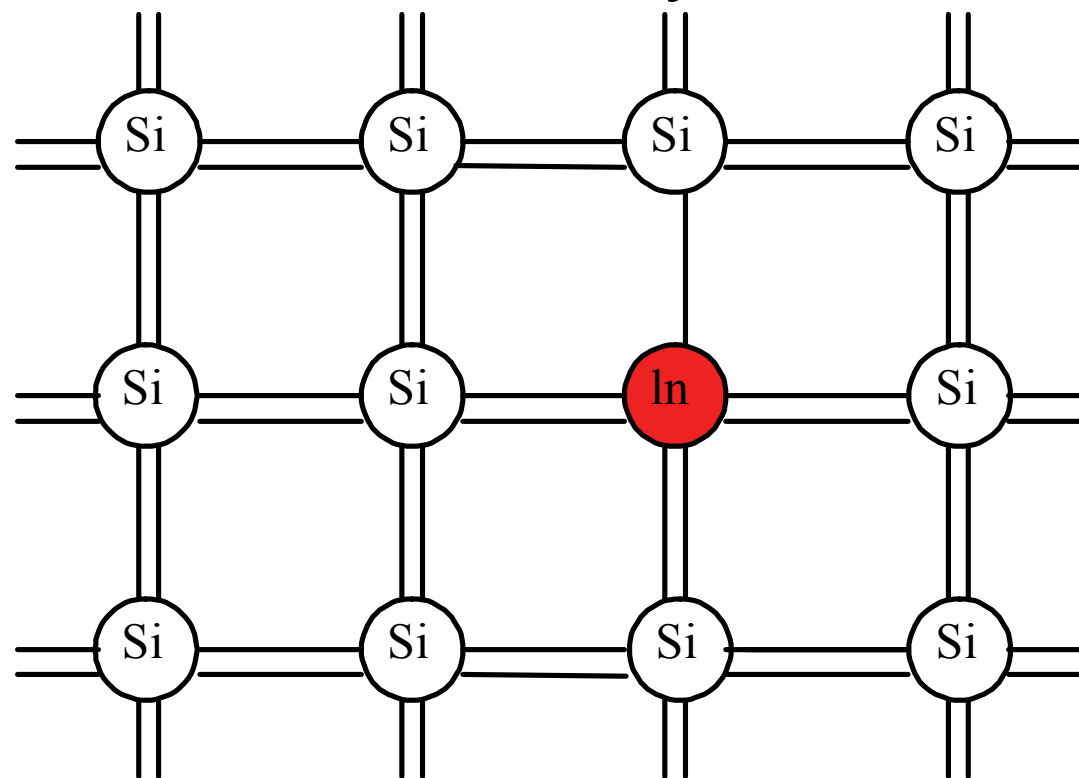
$n$  – koncentrácia voľných elektrónov [ $\text{m}^{-3}$ ]

$p$  – koncentrácia voľných dier [ $\text{m}^{-3}$ ]

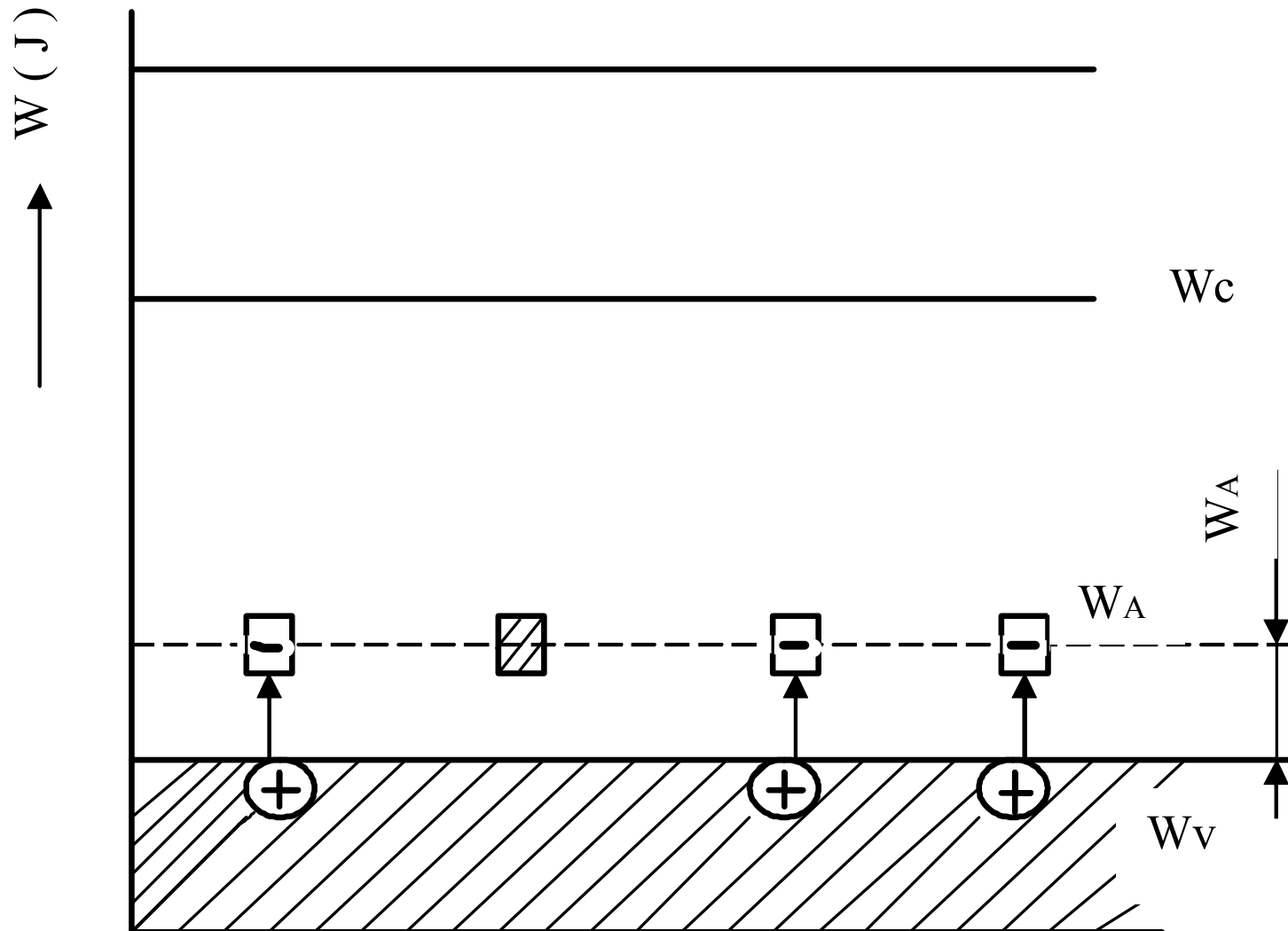
$n_i$  – koncentrácia elektrónov vo vlastnom polovodiči [ $\text{m}^{-3}$ ]

# 1.1 Úvod – Nevlastné polovodiče

Obsahujú poruchy v kryštalickej mriežke (substitučné prímesi). Deformujú sa energetické pomery → vytvárajú sa dovolené hladiny v zakázanom pásme.



# 1.1 Úvod – Nevlastné polovodiče







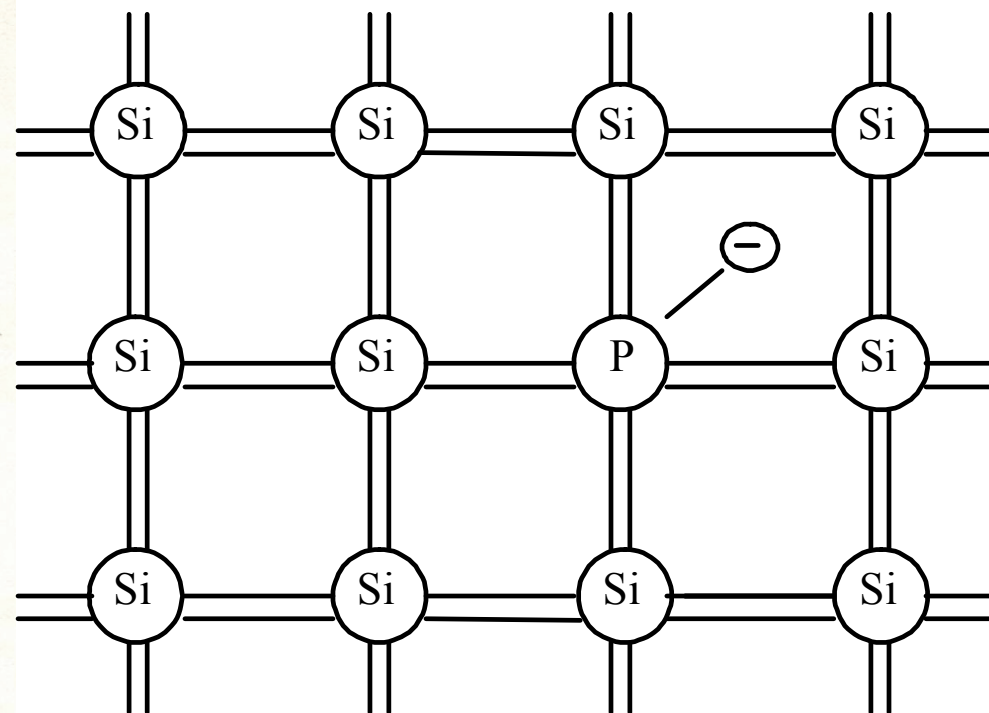
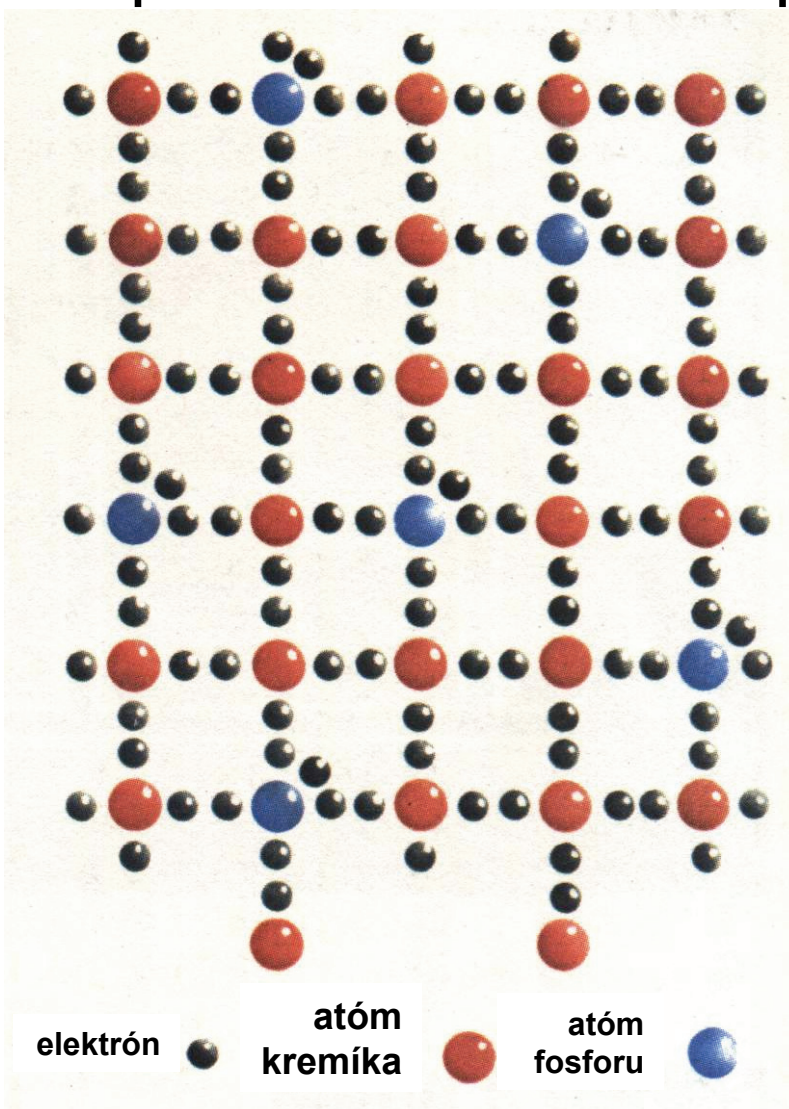
# 1.1 Úvod – Nevlastné polovodiče

Polovodiče, kde voľné nosiče elektrického náboja vznikajú ionizáciou AKCEPTOROV → polovodiče typu **P**. Koncentrácia voľných dier je vyššia ako koncentrácia elektrónov → diery sú majoritné a elektróny minoritné nosiče náboja.

Podobne: bór, gálium, hliník a pod.

# 1.1 Úvod – Nevlastné polovodiče

Po pridaní 5-mocného prvku:



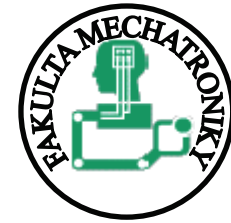
# 1.1 Úvod – Nevlastné polovodiče



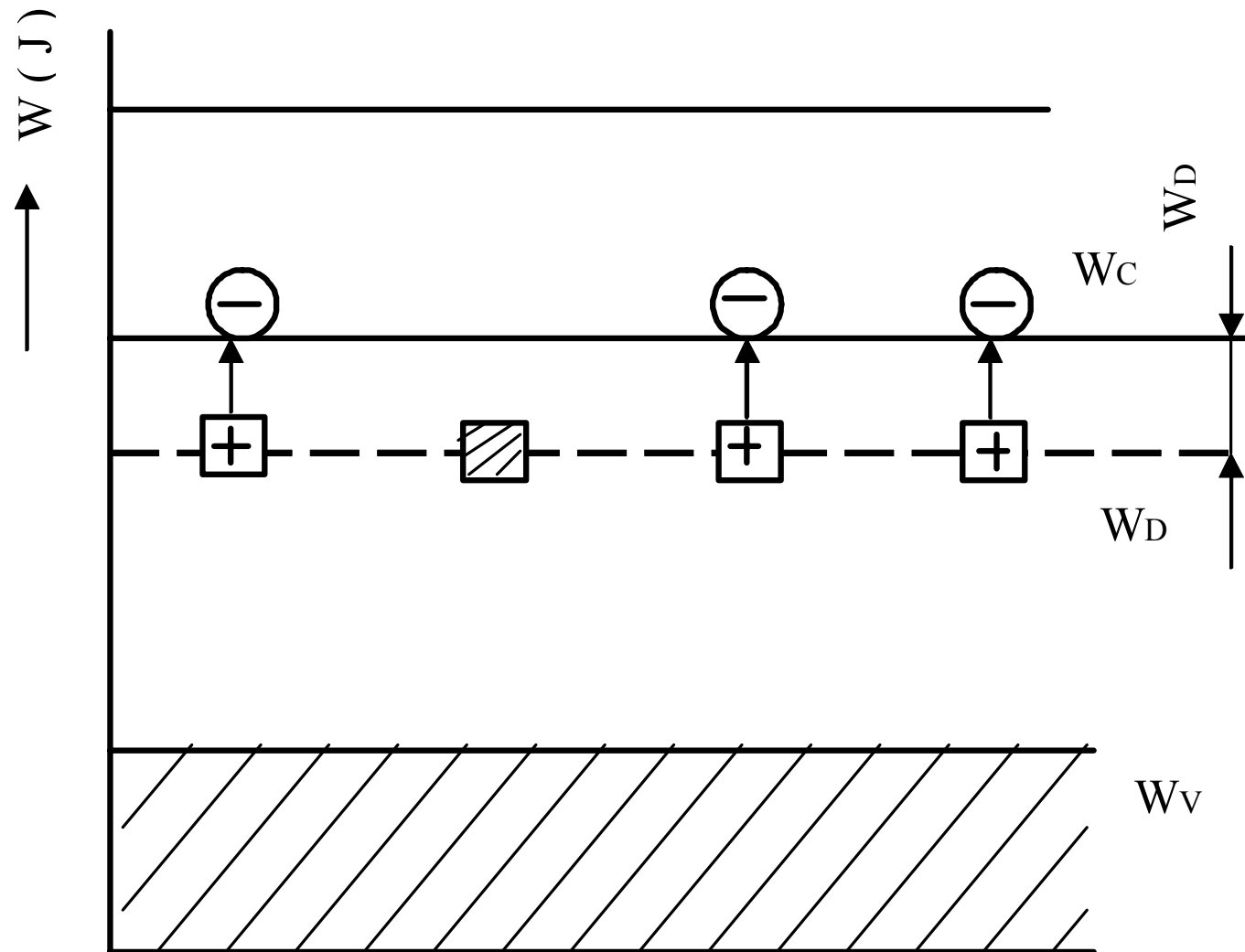
Po pridání 5-mocného prvku:

je nevyužitý piaty valenčný elektrón (NIE VŠAK VOL'NÝ – viaže ho jadro fosforového atómu).

Ostatné atómy túto väzbu zoslabujú → stačí malá energia a elektrón sa odtrhne → DONOR



# 1.1 Úvod – Nevlastné polovodiče





# 1.1 Úvod – Nevlastné polovodiče

$W_D$  – donorová energetická hladina

$\Delta W_D$  – aktivačná energia donorov

$$\Delta W_D = W_C - W_D$$

Vzniká polovodič typu **N**.

majoritné nosiče náboja: elektróny

minoritné nosiče náboja: diery

Podobne: antimón, dusík, arzén,...





# 1.1 Úvod – Nevlastné polovodiče

$W_A$  – akceptorová energetická hladina

$\Delta W_A$  – aktivačná energia akceptorov

$$\Delta W_A = W_A - W_V$$

Preskokom vznikne:     1 nepohyblivý ión india –  
  1 kladne nabitá voľná diera +

Atóm india môže prijať navyše jeden elektrón →  
akceptor



# 1.1 Úvod – Polovodiče v rovnovážnom stave



Termodynamická rovnováha →  
elektrická neutralita + tepelná rovnováha

# 1.1 Úvod – Polovodiče v rovnovážnom stave



elektrická neutralita:

a, vlastné polovodiče:  $n = p$

b, polovodiče typu **N**:  $n = p + N_D$  ( $N_A = 0$ )

c, polovodiče typu **P**:  $p = n + N_A$  ( $N_D = 0$ )

d, názov podľa toho,

čo prevláda:  $n + N_A = p + N_D$

# 1.1 Úvod – Polovodiče v rovnovážnom stave



tepelná rovnováha:

interakcia elektrónov a fonónov (tepelné kvantá) → vznik voľných nosičov elektrického náboja a zároveň aj ich zánik (rekombinácia)

ustálený stav → rovnováha vzniku a rekombinácie

# 1.1 Úvod – Polovodiče v rovno- vážnom stave



tepelná rovnováha:

$g$ : [ $m^{-3}s^{-1}$ ] koeficient generácie (počet vzniknutých voľných nosičov na jednotku objemu za jednotku času)

$r$ : [ $m^{-3}s^{-1}$ ] koeficient rekombinácie (koeficient úmernosti medzi počtom rekombinácií v jednotke objemu za jednotku času a súčinom „ $n.p$ “:

$$r = R/(n.p)$$

$R$ : [ $m^{-3}s^{-1}$ ] je počet rekombinácií v jednotke objemu za jednotku času

# 1.1 Úvod – Polovodiče v rovnovážnom stave



tepelná rovnováha:

rovnovážny stav:  $g = R$

$$g = r \cdot n \cdot p \rightarrow n \cdot p = g/r = n_i^2$$

Nevlastné polovodiče s rovnakou koncentráciou donorov a akceptorov majú podobné vlastnosti ako vlastné polovodiče  $\rightarrow$  kvázivlastné polovodiče



# 1.1 Úvod – Polovodiče v nerovnovážnom stave – majoritné nosiče



porucha = porušenie elektrickej neutrality

dôležité: za aký čas sa objaví rovnováha →  
frekvencia vonkajších porúch bez skreslenia signálu

$$\varepsilon \operatorname{div} \mathbf{E} = \rho \quad \operatorname{div} = \partial / \partial x + \partial / \partial y + \partial / \partial z$$

kde:

$\varepsilon$  – absolútna permitivita [ $\text{Fm}^{-1}$ ]

$\mathbf{E}$  – intenzita elektrického poľa [ $\text{Vm}^{-1}$ ]

$\rho$  – priestorový náboj [ $\text{Cm}^{-3}$ ]

# 1.1 Úvod – Polovodiče v nerovnovážnom stave – majoritné nosiče



Porucha → vyvolá usmernený pohyb voľných nosičov náboja tak, aby porucha zanikla.

Hustota elektrického prúdu:

$$J = \sigma \cdot E$$

$\sigma$  [ $\text{Sm}^{-1}$ ] → konduktivita

# 1.1 Úvod – Polovodiče v nerovnovážnom stave – majoritné nosiče



Náboj sa znižuje podľa vzťahu:

$$-\frac{d\rho}{dt} = \text{div}J$$

$$-\frac{d\rho}{dt} = \sigma \text{div}E \quad \rightarrow \quad \frac{d\rho}{dt} + \frac{\sigma}{\varepsilon} \rho = 0$$

riešenie :

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{t}{\tau_r}}$$

$\rho_0$  [Cm<sup>-3</sup>] priestorový náboj v čase  $t = 0$

$\tau_r$  [s] relaxačný čas:  $\tau_r = \varepsilon/\sigma$

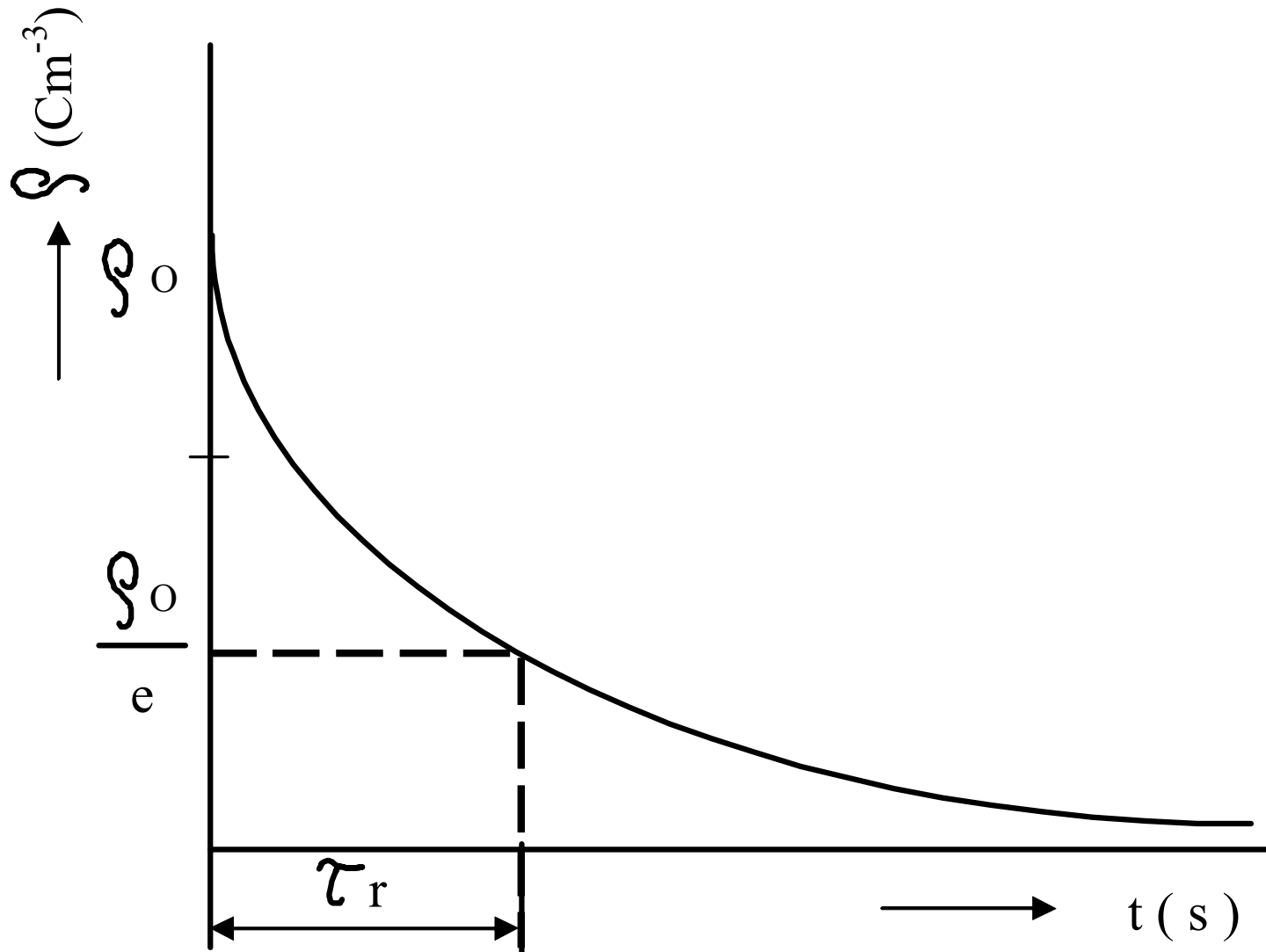
# 1.1 Úvod – Polovodiče v nerovnovážnom stave – majoritné nosiče



Zánik deja: pre  $t \geq 3\tau_r$

kremík, germánium:  $\tau_r = 10^{-12} \text{ s} \rightarrow f \approx 300 \text{ GHz}$

# 1.1 Úvod – Polovodiče v nerovnovážnom stave – majoritné nosiče





# 1.1 Úvod – Polovodiče v nerovnovážnom stave – minoritné nosiče



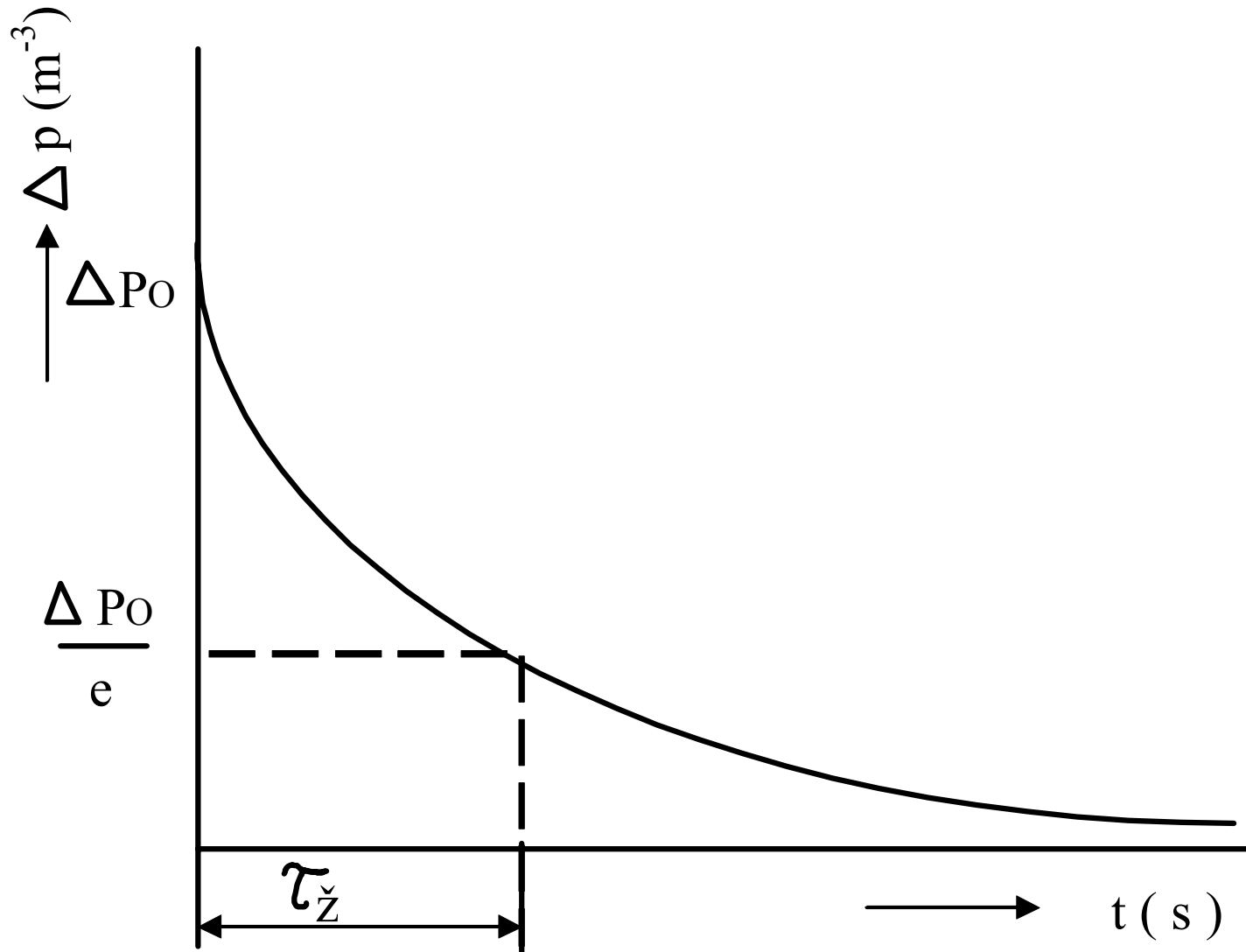
zvýši sa koncentrácia voľných dier o  $\Delta P \rightarrow$   
adekvátny postup  $\rightarrow$

$$\Delta p = \Delta p_0 e^{-\frac{t}{\tau_z}} \quad \text{kde:}$$

$r(n+p) = \tau_z =$  doba života minoritných nosičov

Doba života minoritných nosičov je tým menšia, čím väčší je koeficient rekombinácie voľných nosičov náboja. Pretože rekombinácia sa uskutočňuje najčastejšie cez poruchy kryštalickej mriežky  $\rightarrow$  na základe doby života možno posúdiť dokonalosť mriežky

# 1.1 Úvod – Polovodiče v nerovnovážnom stave – minoritné nosiče





# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

Polovodič v elektrickom poli  $\rightarrow$  pohyb + v smere intenzity elektrického poľa, - proti smeru

Vzniká elektrický prúd  $\rightarrow$  množstvo náboja, ktorý prejde za jednotku času jednotkovým prierezom

Dôležité parametre:

koncentrácia nosičov

pohyblivosť nosičov (miera rýchlosti pohybu pod účinkom elektrického poľa)



# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

$$\sigma = e(n \cdot u_n + p \cdot u_p)$$

kde:

$e$  [C] náboj elektrónu

$u_n, u_p$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$ ] pohyblivosť





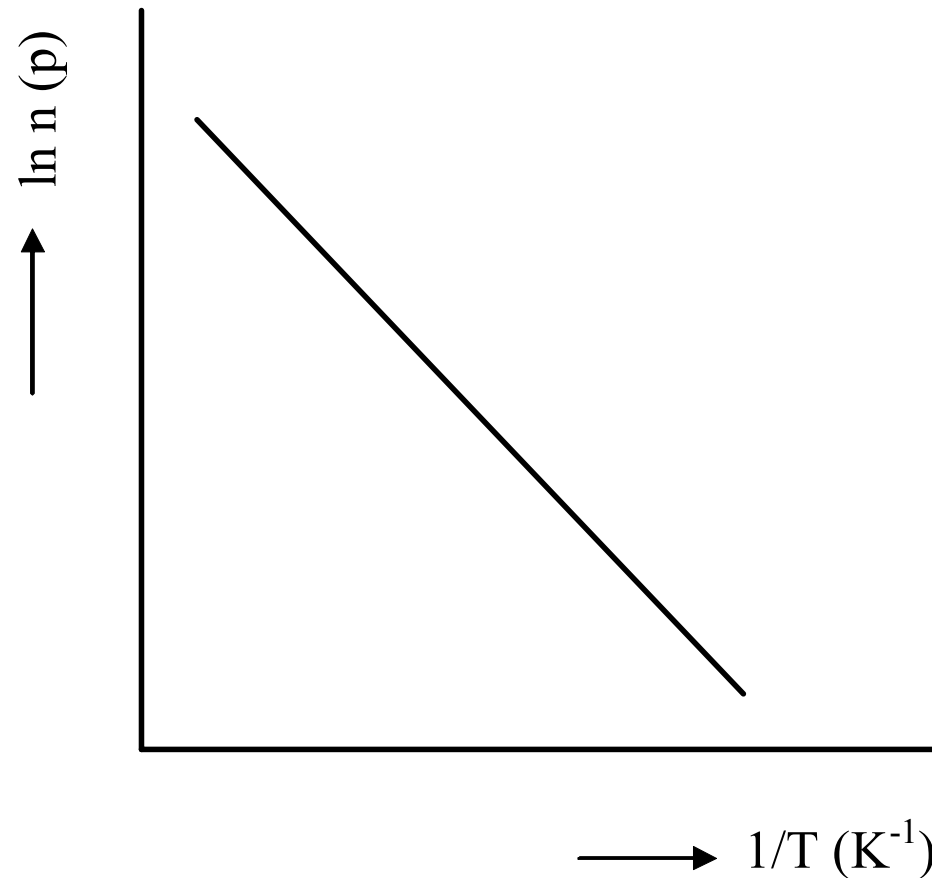
# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

Ďalej:

- a. koncentrácia voľných elektrónov a dier vo vlastných polovodičoch,
- b. koncentrácia voľných elektrónov a dier v nevlastných polovodičoch,
- c. pohyblivosť vo vlastných polovodičoch
- d. pohyblivosť v nevlastných polovodičoch

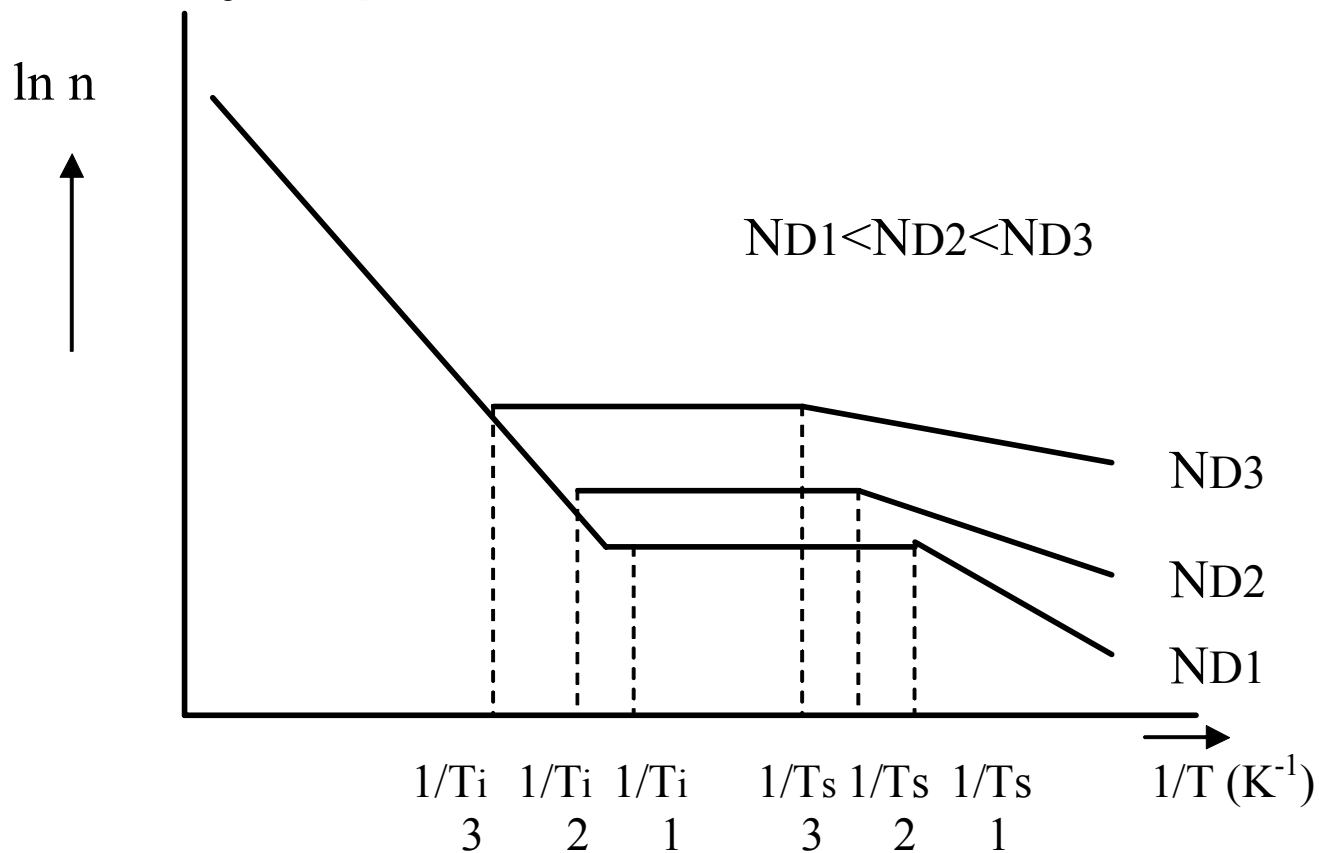
# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

a. Koncentrácia voľných elektrónov a dier vo vlastných polovodičoch



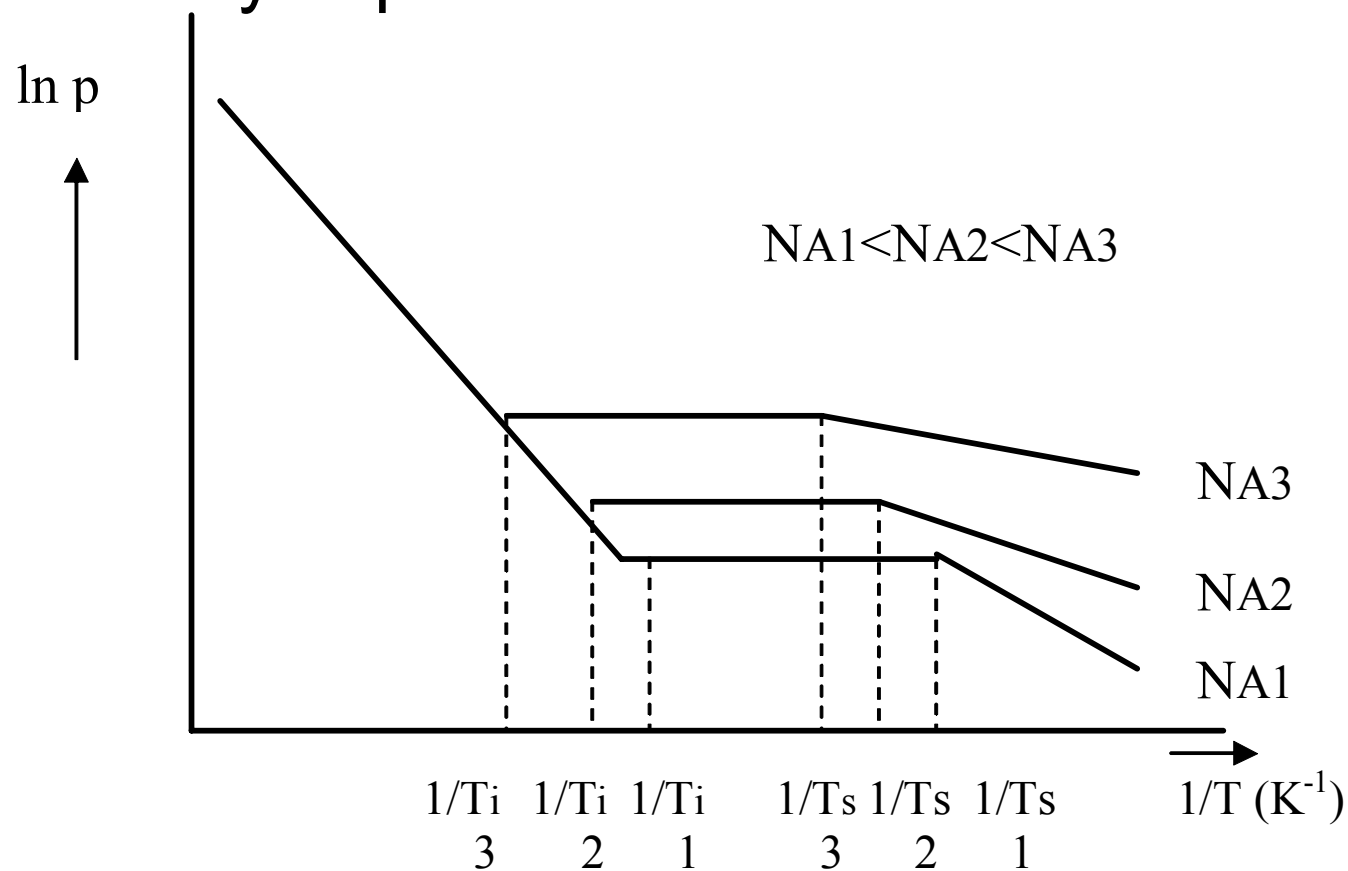
# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

## b. Koncentrácia voľných elektrónov a dier v nevlastných polovodičoch



# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

## b. Koncentrácia voľných elektrónov a dier v nevlastných polovodičoch







# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

b. Koncentrácia voľných elektrónov a dier v nevlastných polovodičoch

$T_s$  → úplná ionizácia prímiesí → všetky elektróny prešli do vodivostného stavu

$T_i$  → nad touto teplotou platia mechanizmy ako vo vlastných polovodičoch (rovnaké sú aj hodnoty)



# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

## c. Pohyblivosť vo vlastných polovodičoch

$$u = \frac{|\vec{v}|}{|E|} \quad [m^2s^{-1}V^{-1}]$$

← stredná rýchlosť

stredná rýchlosť závisí od rozptylu nosičov náboja  
rozptyl → zmena smeru ich pohybu:

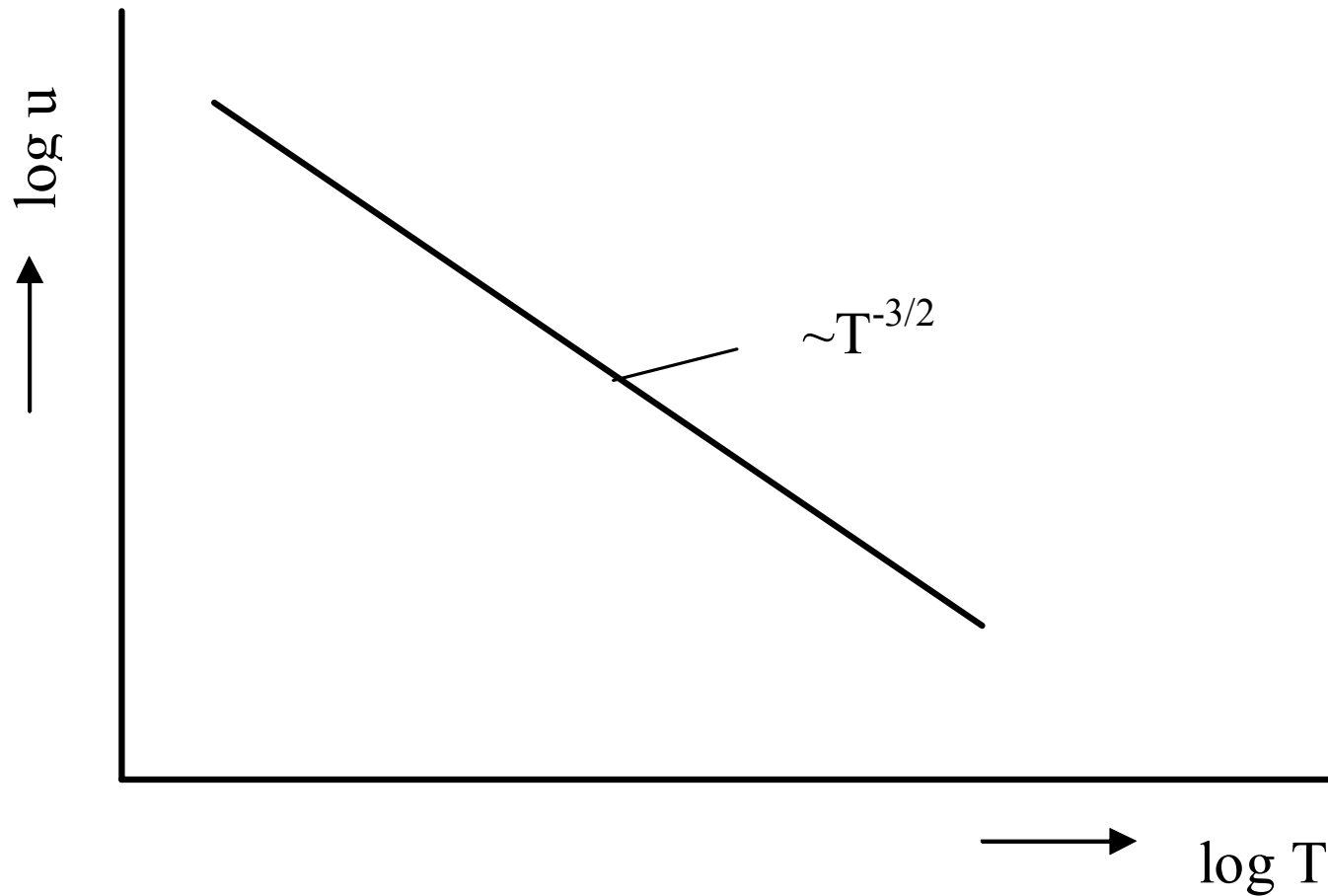
rozptyl na tepelných kmitoch kryštalickej mriežky

rozptyl na ionizovaných prímiesiach

rozptyl na ostatných poruchách kryštalickej mriežky

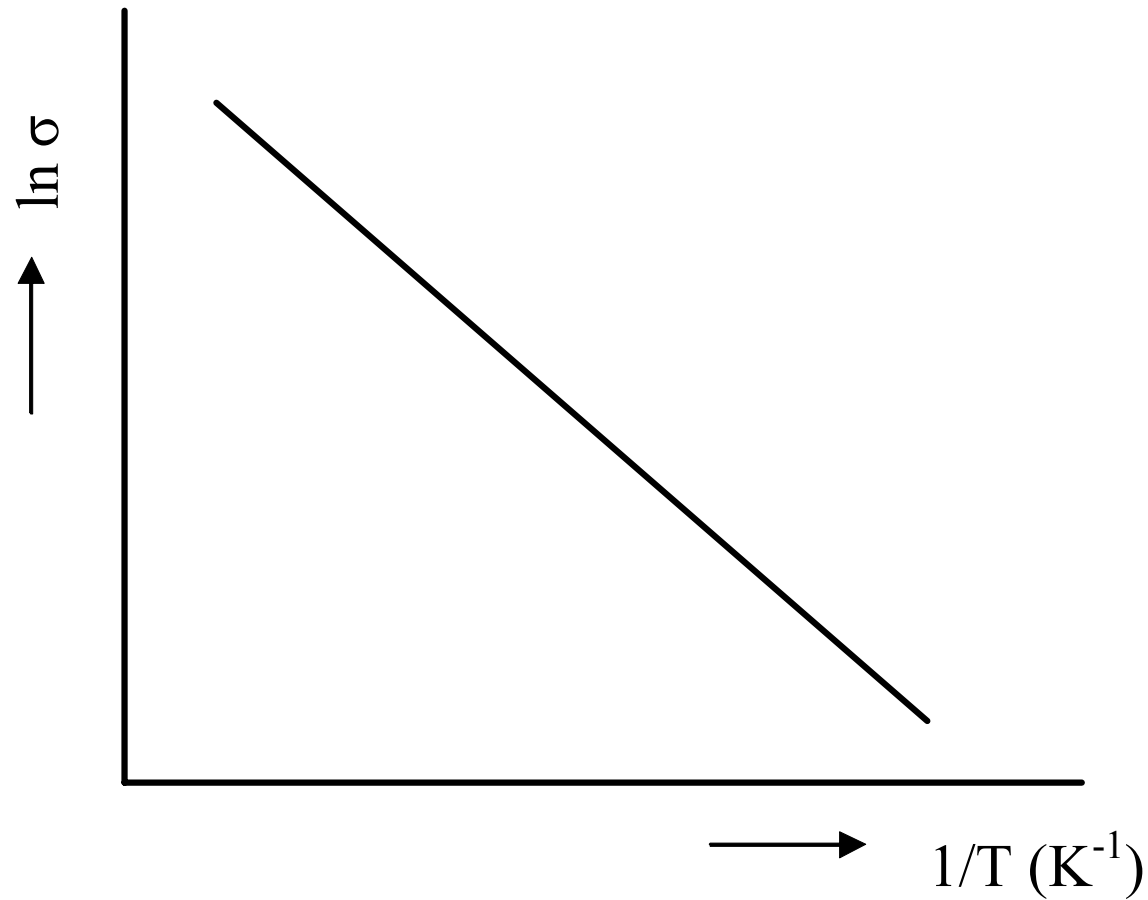
# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

## c. Pohyblivosť vo vlastných polovodičoch



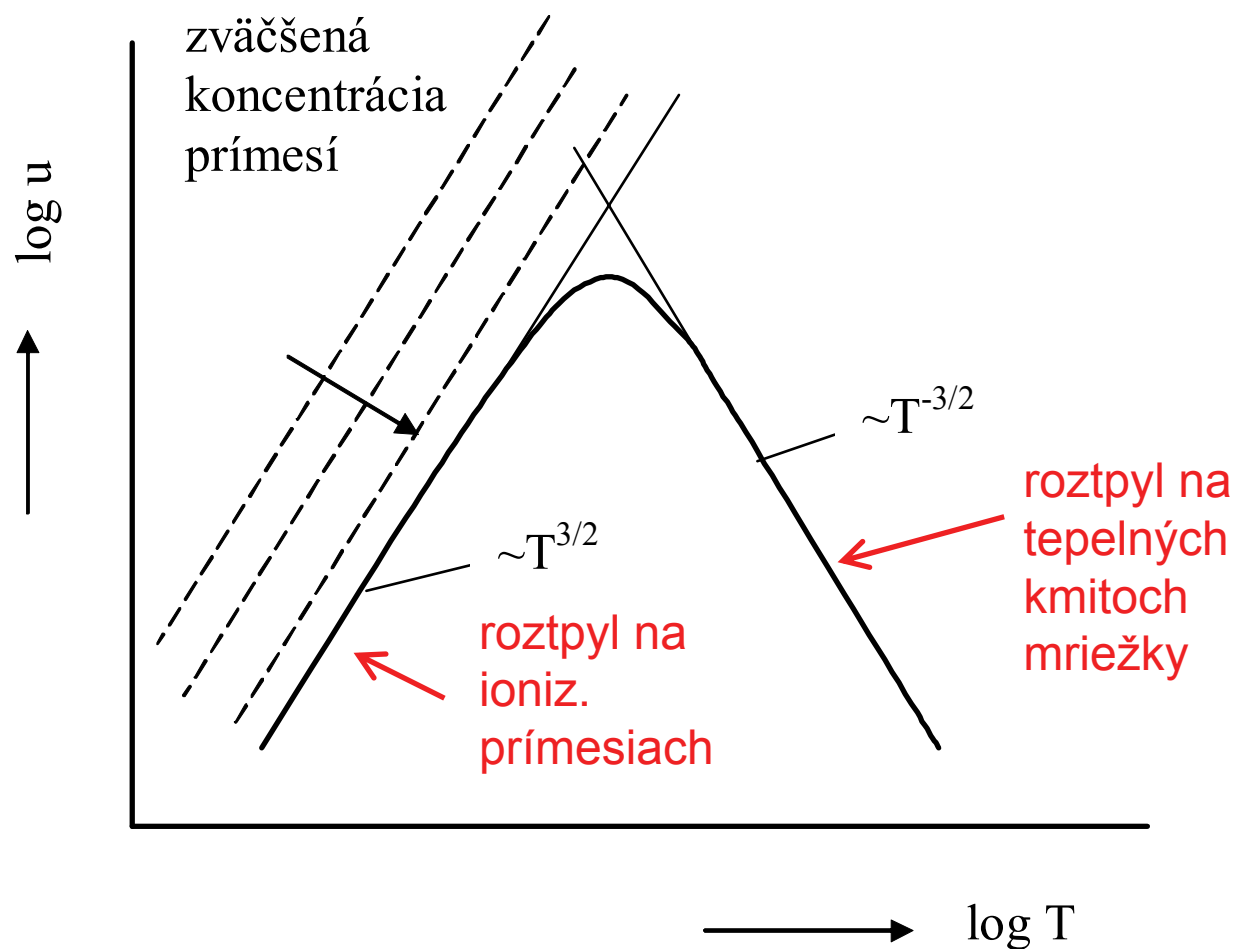
# 1.1 Úvod – Elektrická vodivost'

Vlastné polovodiče



# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

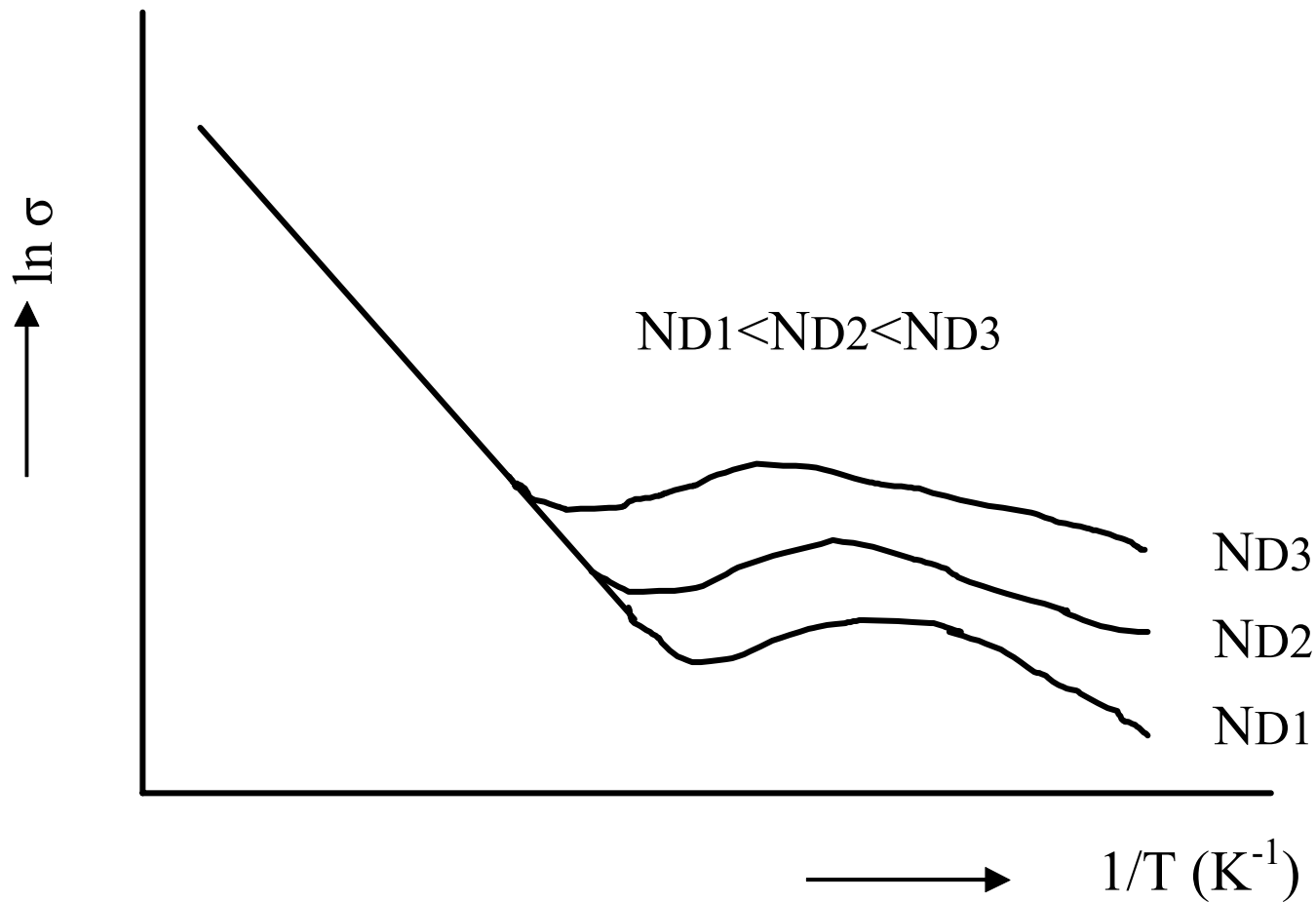
## d. Pohyblivosť v nevlastných polovodičoch





# 1.1 Úvod – Elektrická vodivosť

## d. Vodivosť v nevlastných polovodičoch



# 1.1 Úvod – Kontakt kovu a polovodiča



Povrch materiálu → iné vlastnosti ako vnútro  
(nenасыtené väzby, množstvo porúch a nečistôt,  
nie sú ideálne hladké)

Ideálny kontakt → hrúbka kontaktu  $\approx$  vzdialenosť  
medzi atómami

Dôležitý parameter: hodnoty výstupných prác  
elektrónov:  
najprv elektrón z materiálu s menšou výstupnou  
prácou do druhého → vytvorenie elektrického poľa  
→ opačný jav

Po krátkom čase nastane rovnováha

# 1.1 Úvod – Kontakt kovu a polovodiča



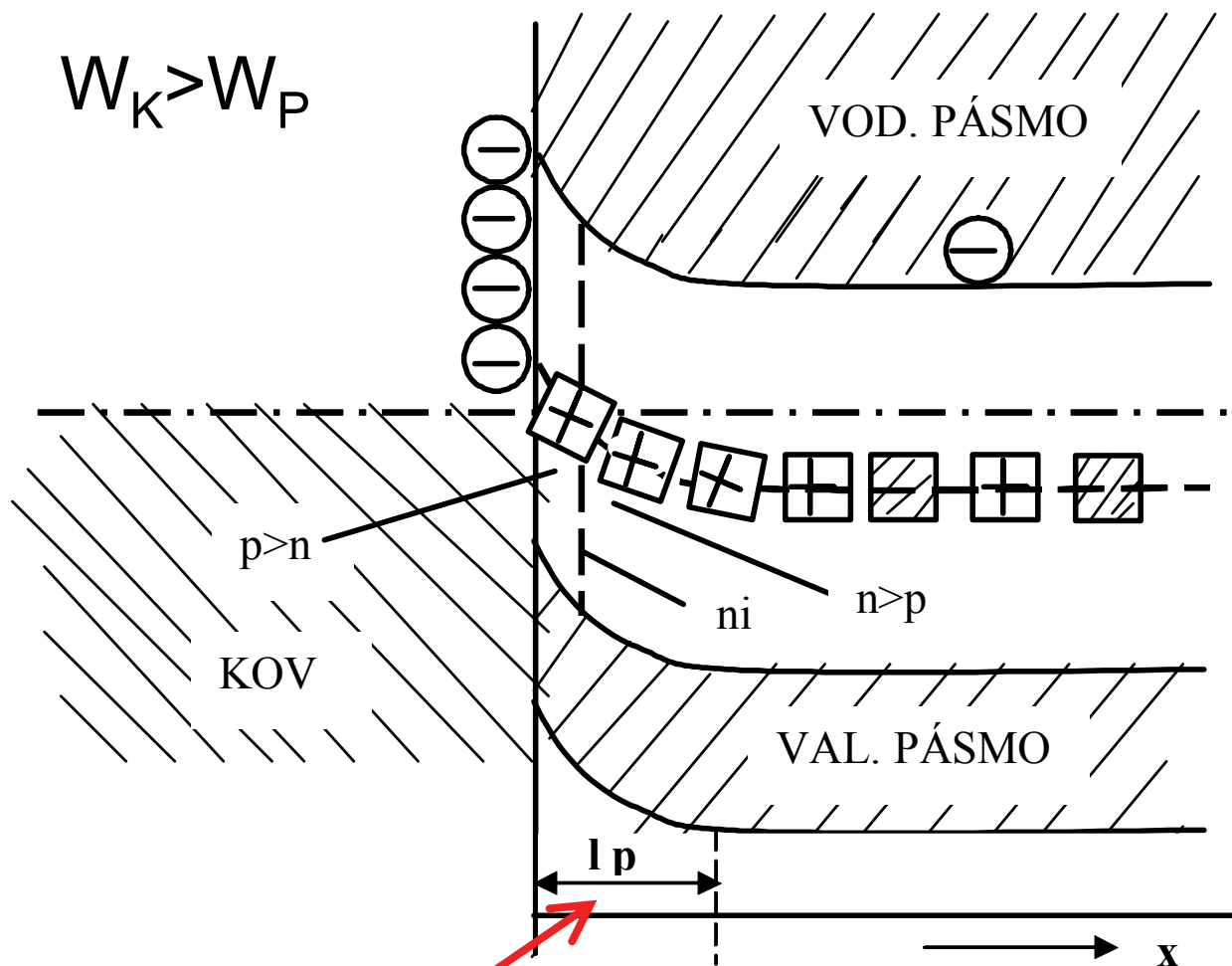
$W_K$  – výstupná práca elektrónu z kovu

$W_P$  – výstupná práca elektrónu z polovodiča

Kontaktové napätie: 
$$U_K = \frac{W_K - W_P}{e} \quad [V]$$

zvyčajne cca 1 V

# 1.1 Úvod – Kontakt kovu a polo- vodiča

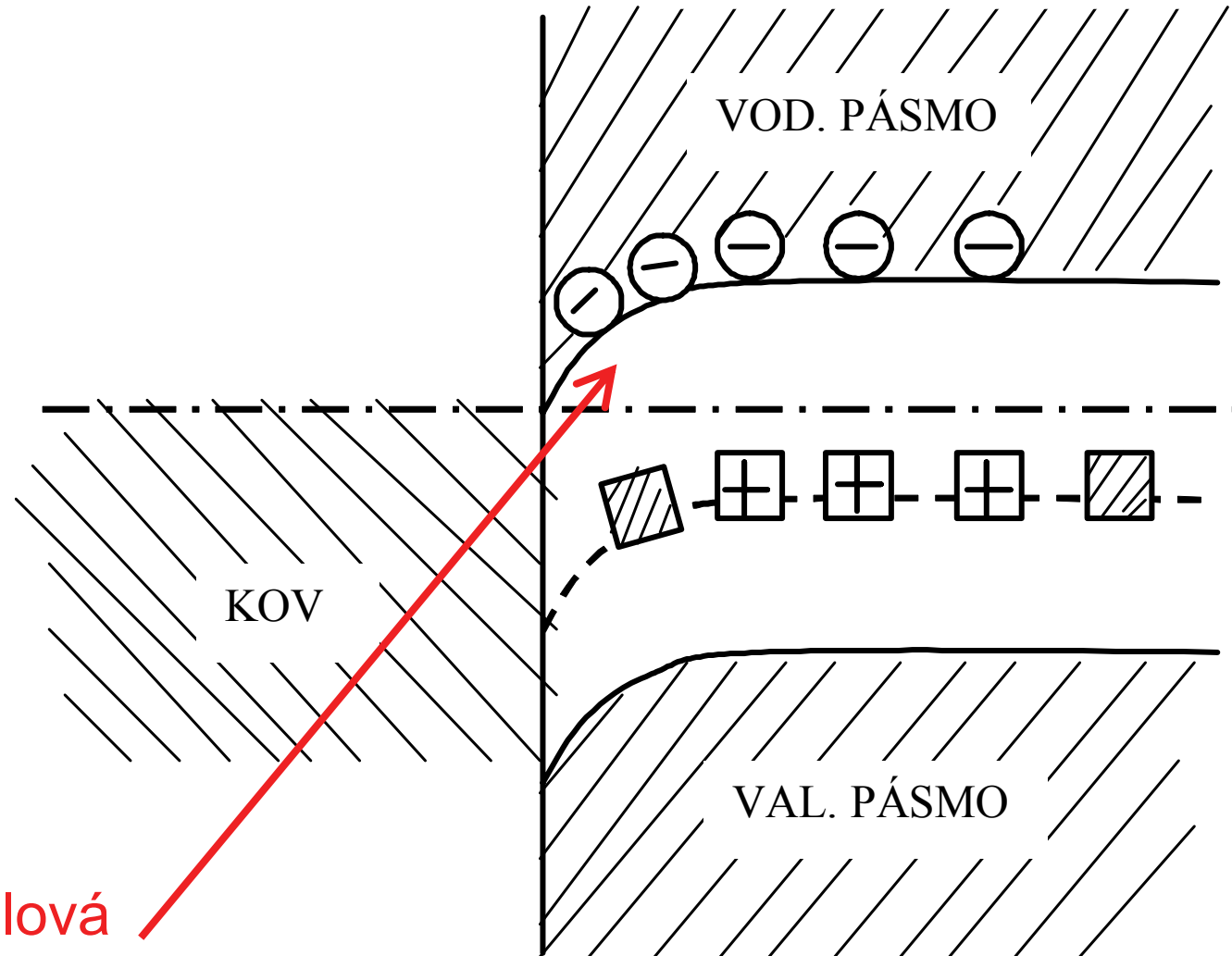


Hradlová  
vrstva

# 1.1 Úvod – Kontakt kovu a polo- vodiča



$$W_K < W_P$$



Antihradlová  
vrstva



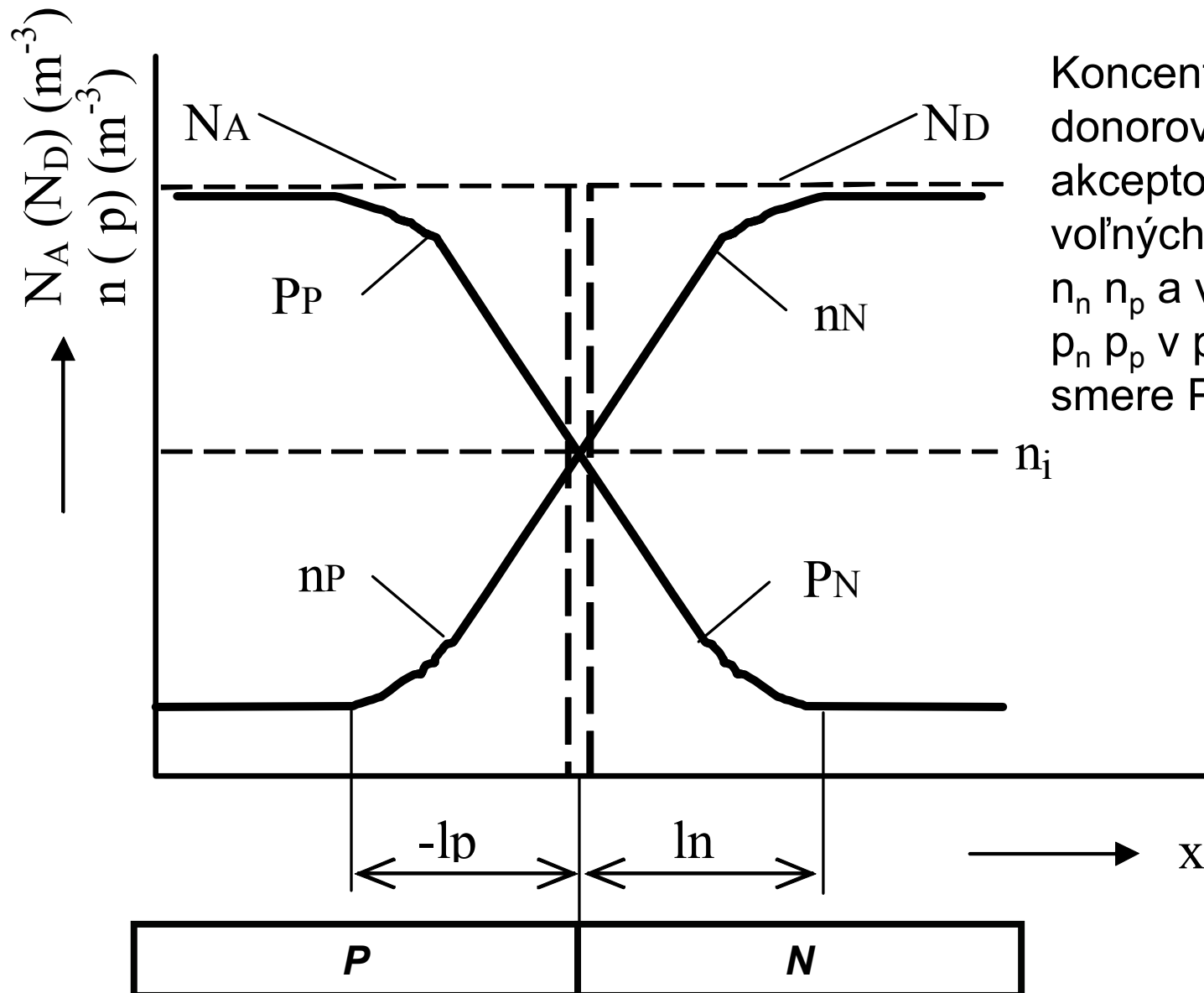


# 1.1 Úvod – PN priechod

PN priechod → priestorová zmena typu polovodiča

- do jednej časti donory
- do druhej časti akceptory.

# 1.1 Úvod – PN priechod



Koncentrácia donorov  $N_D$ , akceptorov  $N_A$ , voľných elektrónov  $n_n$   $n_p$  a voľných dier  $p_n$   $p_p$  v pozdĺžnom smere PN priechodu

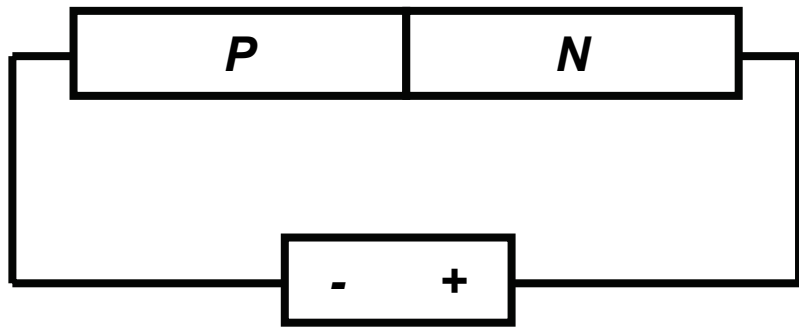


# 1.1 Úvod – PN priechod

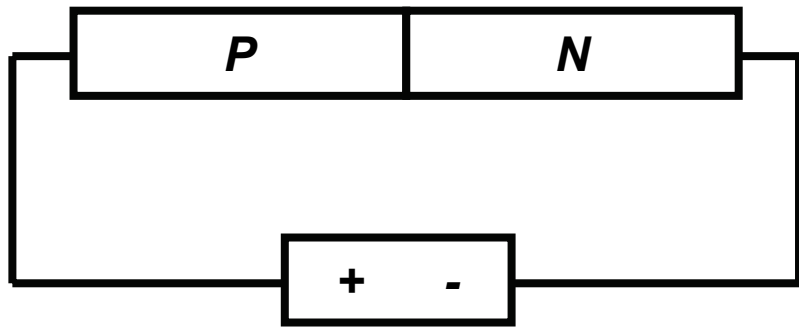
Difúzia  $\rightarrow$  elektróny z „**N**“ do „**P**“ a diery z „**P**“ do „**N**“ až kým nenastane rovnovážny stav. Vznikne el. pole, ktoré bráni ďalšej difúzii.

Vzniká vrstva ochudobnená o nosiče  $\rightarrow$  hradlová vrstva. Jej hrúbku možno regulovať pripojeným napätím

# 1.1 Úvod – PN priechod



Polarita zhodná s polar. difúzneho napätia  $U_D \rightarrow$  major. nosiče sú vytláčané zo stredu PN priechodu k okrajom  $\rightarrow$  zväčšenie hradlovej vrstvy



Zmenšenie hradlovej vrstvy  $\rightarrow$  ak  $U = U_D \rightarrow$  hradl. vrstva zanikne



# 1.1 Úvod – PN prechod

VA charakteristika PN prechodu:

Podmienka rovnosti difúznej a ohmickej prúdovej hustoty:

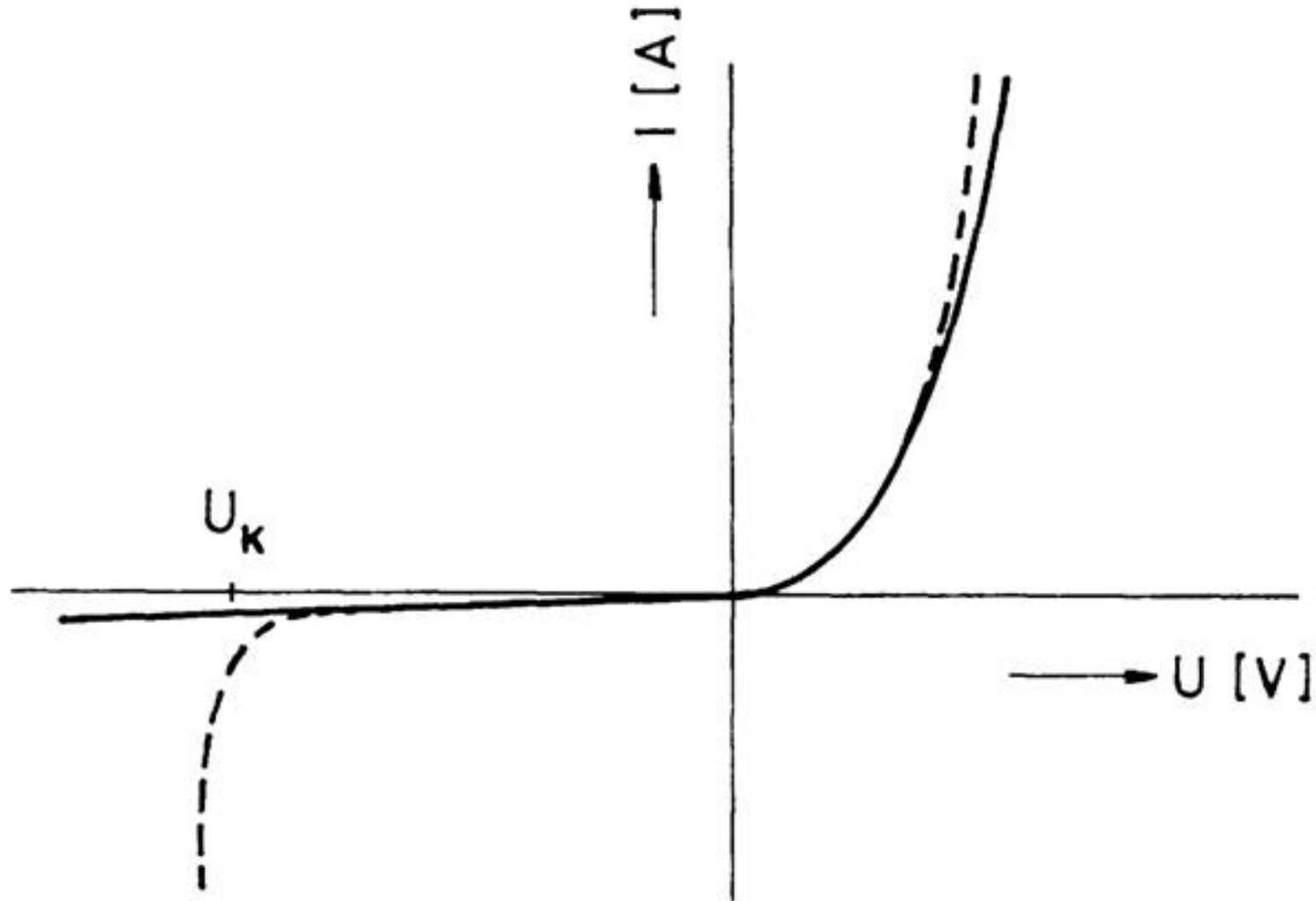
$$e \cdot D_n \frac{dn}{dx} = e \cdot n \cdot u_n \cdot E_D$$

$$J = J_s \left[ e^{\pm \frac{eU}{kT}} - 1 \right]$$



# 1.1 Úvod – PN prechod

VA charakteristika PN prechodu





# 1.1 Úvod – PN priedchod

## Základné fyzikálne javy v polovodičoch

### Najdôležitejšie skupiny:

1. elektrické javy - diódový, tranzistorový, lavinový, Zenerov, prepínací a pamäťový
2. termoelektrické – Seebekov, Peltierov, Thomsonov
3. galvanomagnetické – Hallov, magnetorezistenický, Ettinghausenov jav
4. termomagnetické – Nernstov-Ettinghausenov, Righiho-Leducov jav
5. fotoelektrické – vnútorný, vonkajší, fotovoltický jav
6. luminiscenčné javy

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



Najdôležitejšie skupiny:

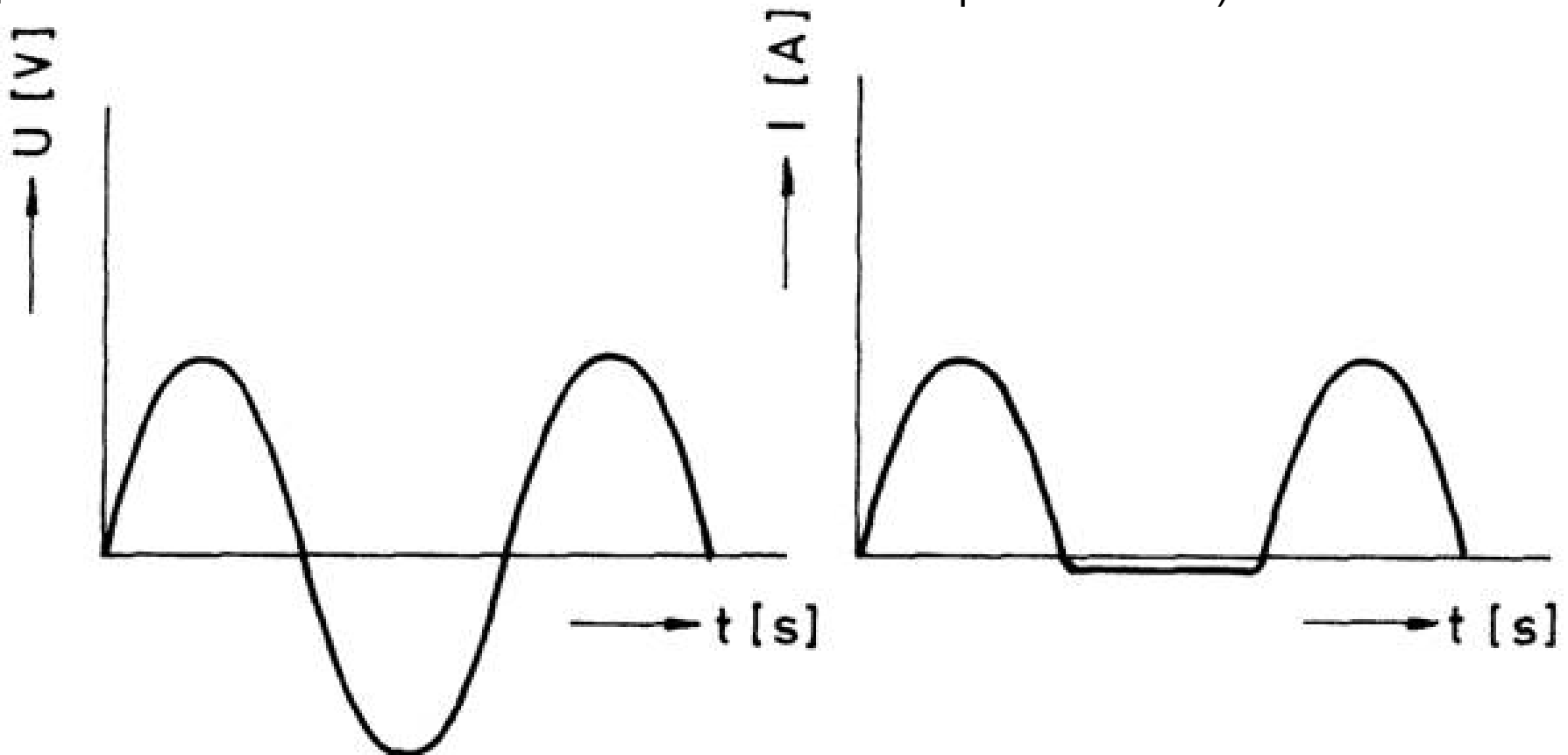
1. elektrické javy - diódový, tranzistorový, lavínový, Zenerov, prepínací a pamäťový
2. termoelektrické – Seebekov, Peltierov, Thomsonov
3. galvanomagnetické – Hallov, magnetorezistenický, Ettinghausenov jav
4. termomagnetické – Nernstov-Ettinghausenov, Righiho-Leducov jav
5. fotoelektrické – vnútorný, vonkajší, fotovoltický jav
6. luminiscenčné javy

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Diódový jav

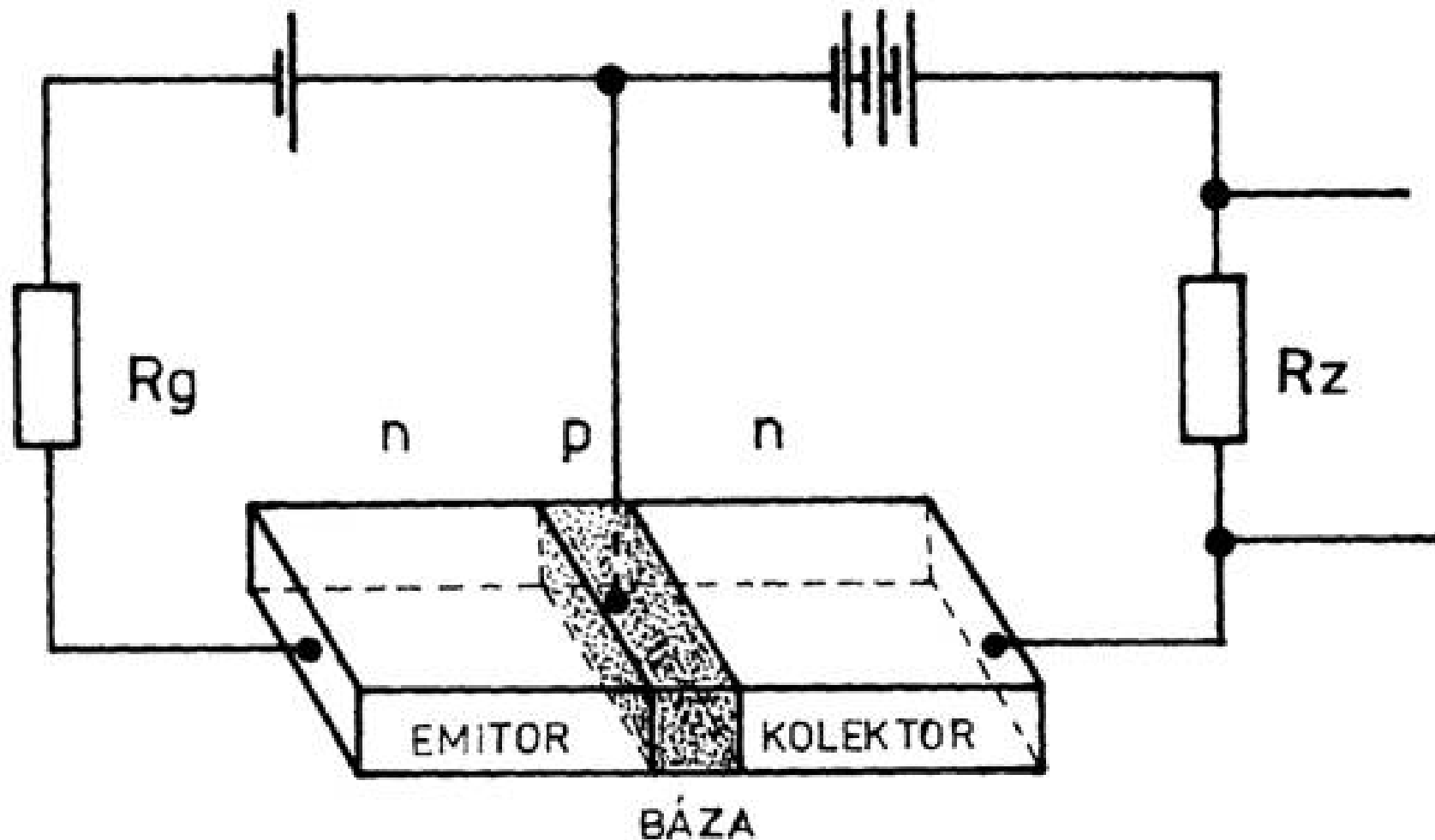
Usmerňovací jav na PN  
priechodoch (alebo na styku  
polovodič-kov)



# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



Tranzistorový jav





# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



Tranzistorový jav

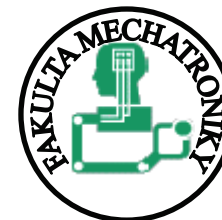
Zosilňovací jav.

Tranzistory:

- bipolárne (major. a minor. nosiče)
- unipolárne (len major. nosiče)
  
- PNP
- NPN

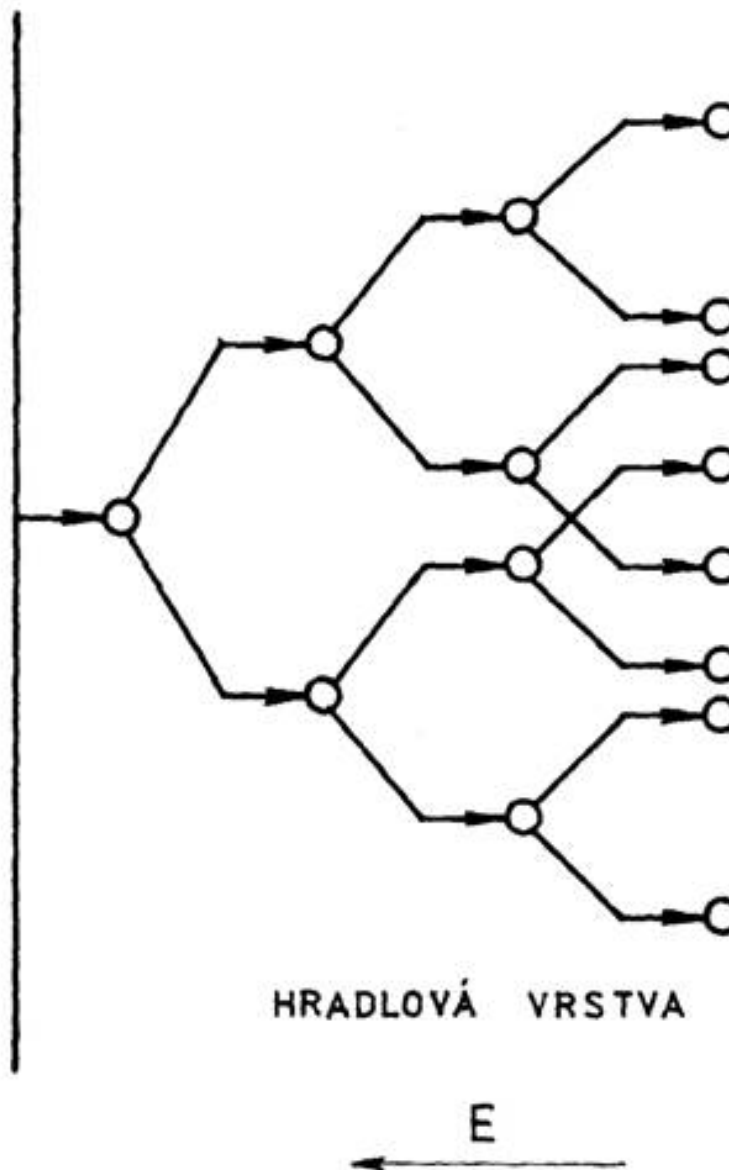
Zosilnenie: veľký počet nosičov (väčšina) ktorých emitor vstrekol do bázy sa dostane ku kolektoru a prejde kolektorovým obvodom. Treba zaistiť, aby čo najmenší počet emitovaných nosičov rekombinoval v báze → báza je tenká.

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



Lavínový jav

Nárazová  
ionizácia atómov  
elektrónmi



# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



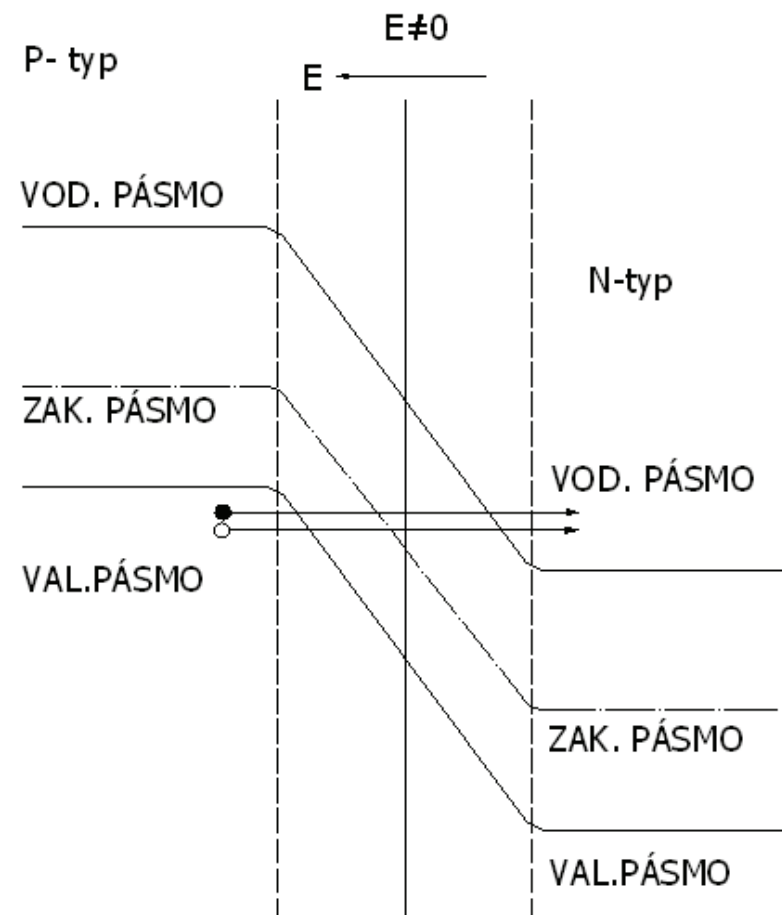
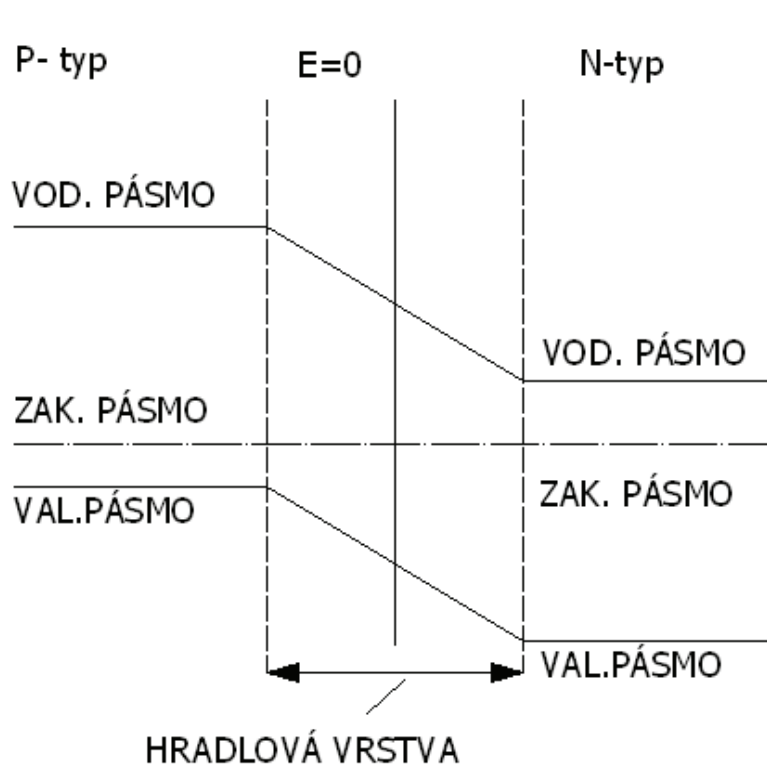
## Zenerov jav

→ uvoľňovanie el. z kryštal. mriežky polovodiča silným el. poľom (Zenerove diódy = tenká hradlová vrstva → malé napätie vyvolá silné pole). Súčasne sa uplatňuje aj lavínový jav.

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



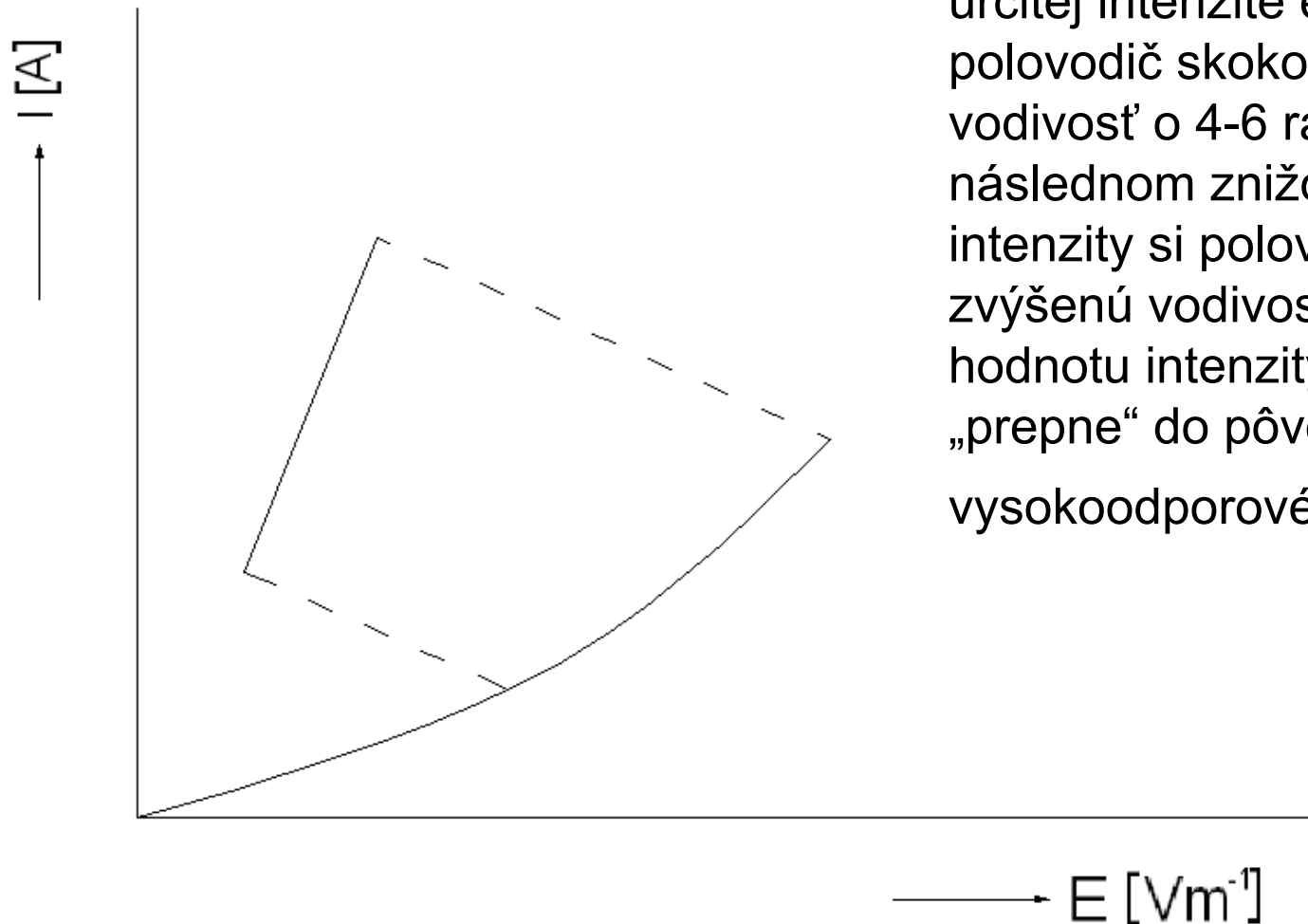
## Zenerov jav



# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Prepínací jav



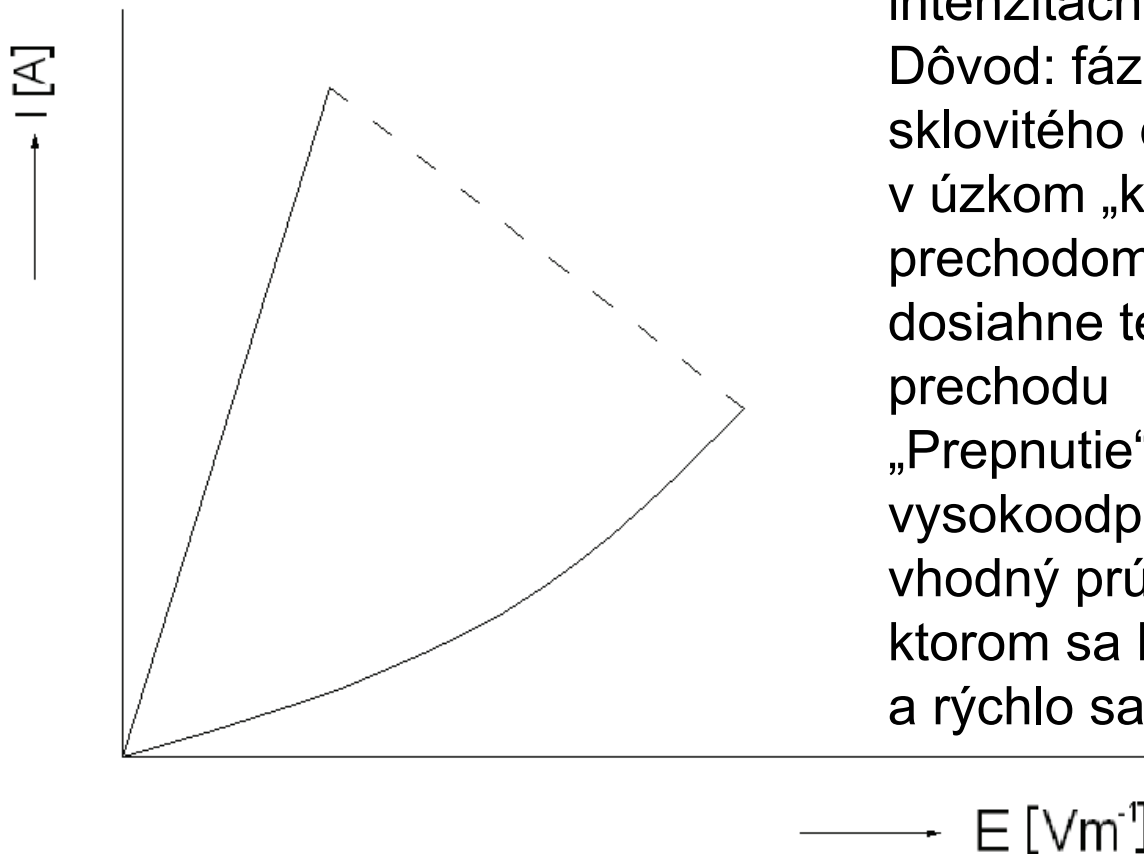
Sklovité polovodiče. Pri určitej intenzite el. poľa polovodič skokom zvýši el. vodivosť o 4-6 rádov. Pri následnom znižovaní intenzity si polovod. udrží zvýšenú vodivosť až po určitú hodnotu intenzity, potom „prepne“ do pôvodného vysokoodporového stavu.



# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Pamäťový jav



Sklovité polovodiče. Platí to isté čo pre prepínací jav, až na to, že ani pri nízkych intenzitách neprepne späť. Dôvod: fázový prechod zo sklovitého do kryštal. stavu v úzkom „kanáliku“, kde sa prechodom el. prúdu dosiahne teplota fázového prechodu „Prepnutie“ do vysokoodporového. stavu: vhodný prúdový impulz, pri ktorom sa kanálik roztaví a rýchlo sa ochladzuje.

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Seebeckov jav

Vznik termoelektrického napätia v látke pozdĺž ktorej existuje gradient teploty.

Seebeck: v uzavretom okruhu zloženom z 2 rozličných vodičov vzniká el. prúd, ak spojené konce majú rozličné teploty

Využitie: meranie teploty, premena tepelnej energie na elektrickú

$$\alpha = U_{\alpha} / (T_2 - T_1) \quad \alpha \text{ [VK}^{-1}\text{]} = \text{koef. termoel. napätia}$$
$$U_{\alpha} \text{ [V]} = \text{termoel. napätie}$$

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Peltierov jav

Pohlcovanie alebo uvoľňovanie tepla na spojoch a rozličných vodičov alebo polovod., ak nimi preteká el. prúd.

Podstata: ak el. prechádzajú z mater. kde je ich energia vyššia do mater. kde je ich energia nižšia → rozdiel sa odovzdá okoliu → otepľovanie. Pri opačnom smere: odčerpanie en. z okolia → ochladzovanie.

$$Q_p = \Pi \cdot I \cdot t \quad \text{Peltierovo teplo [J], Peltierov koeficient [V], prúd [A], čas [s]}$$

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Thompsonov jav

Odovzdávanie alebo odoberanie tepla látkou, ktorou prechádza el. prúd, ak v látke existuje gradient teploty

Podstata: existencia el. s rozličnou en. pozdĺž gradientu teploty. Ak el. prechádza v smere teplotného grad. → dopĺňa si energiu z okolia → ochladzuje sa

$$Q_T = \mu \cdot I \cdot t \frac{dT}{dx}$$

$Q_T$  [Jm<sup>-1</sup>] Thompsonovo teplo

$\mu$  [VK<sup>-1</sup>] Thompsonov koeficient

$dT/dx$  [Km<sup>-1</sup>] gradient teploty

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Hallov jav

Vznik el. napätia na vzorke polovodiča (alebo kovu) ak ňou preteká el. prúd a súčasne sa nachádza v magnetickom poli. Silové pôsobenie na nosiče náboja → Lorentzov vzťah:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \rightarrow \text{vychyľovanie nosičov do oblúka v smere } \mathbf{y}$$

Hallov konštanta  $R_H = f(e, p, n, \dots)$



# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



Magnetorezistenčný jav

= závislosť rezistivity (konduktivity) polovodičov (vodičov) od magnetickej indukcie.

Zakrivenie dráh elektrónov závisí od Hallovoho napätia a od rýchlosti nosičov. Malé a veľké rýchlosti → vychýlenie do opačnej strany

$$\sigma = \sigma_0 \left( 1 - \frac{u^2 B^2}{2} \right)$$

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



Magnetorezistenčný jav

Hallovo pole bráni zakriveniu dráh elektrónov →  
výsledok závisí na rýchlosti el., ktorá je rôzna

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Ettinghausenov jav

Vznik priečného rozdielu teplôt vo vzorke polovodiča (kovu) ak ňou prechádza el. prúd a súčasne sa nachádza v magnetickom poli

Podstata: silové pôsobenie magnetického poľa na nosiče náboja s rozličnými rýchlosťami. Konštanta úmernosti  $\rightarrow R_E$  (Ettinghausenov koeficient):

$$R_E = \frac{\nabla_Y T}{B_Z J_X} \quad [m^3 K J^{-1}] \quad \nabla_Y T : \text{teplotný gradient v smere } Y$$

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Nernstov-Ettinghausenov jav

Vznik priečneho el. poľa vo vzorke kovu (polovod.) ak ním prechádza tepelný prúd a je pritom v magnetickom poli → Nernstov-Ettinghausenov koeficient:

$$R_{NE} = \frac{E_Y}{B_Z \nabla_X T} \quad [m^2 K^{-1} s^{-1}]$$

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Righiho-Leducov jav

Vznik priečného rozdielu teplôt vo vzorke kovu (polovod. ) vloženej do mg. poľa ak ňou prechádza tepelný prúd → Righiho-Leducov koeficient

$$R_{RL} = \frac{\nabla_Y T}{B_Z \nabla_X T} \quad [m^2 V^{-1} s^{-1}]$$



# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Vnútrotný fotoelektrický jav

Zmena en. el. v látke následkom jej osvetlenia resp. ožiarenia. Zmena en. nastane ak el. toto žiarenie absorbujú.

Rozdiel konduktivity osvetleného a neosvetleného polovodiča → fotoelektrická konduktivita:  $\sigma_f = \sigma - \sigma_0$

Svetlom uvoľnené nosiče náboja:  $n_f = g_f \cdot \tau_{\check{z}} \quad [\text{m}^{-3}]$

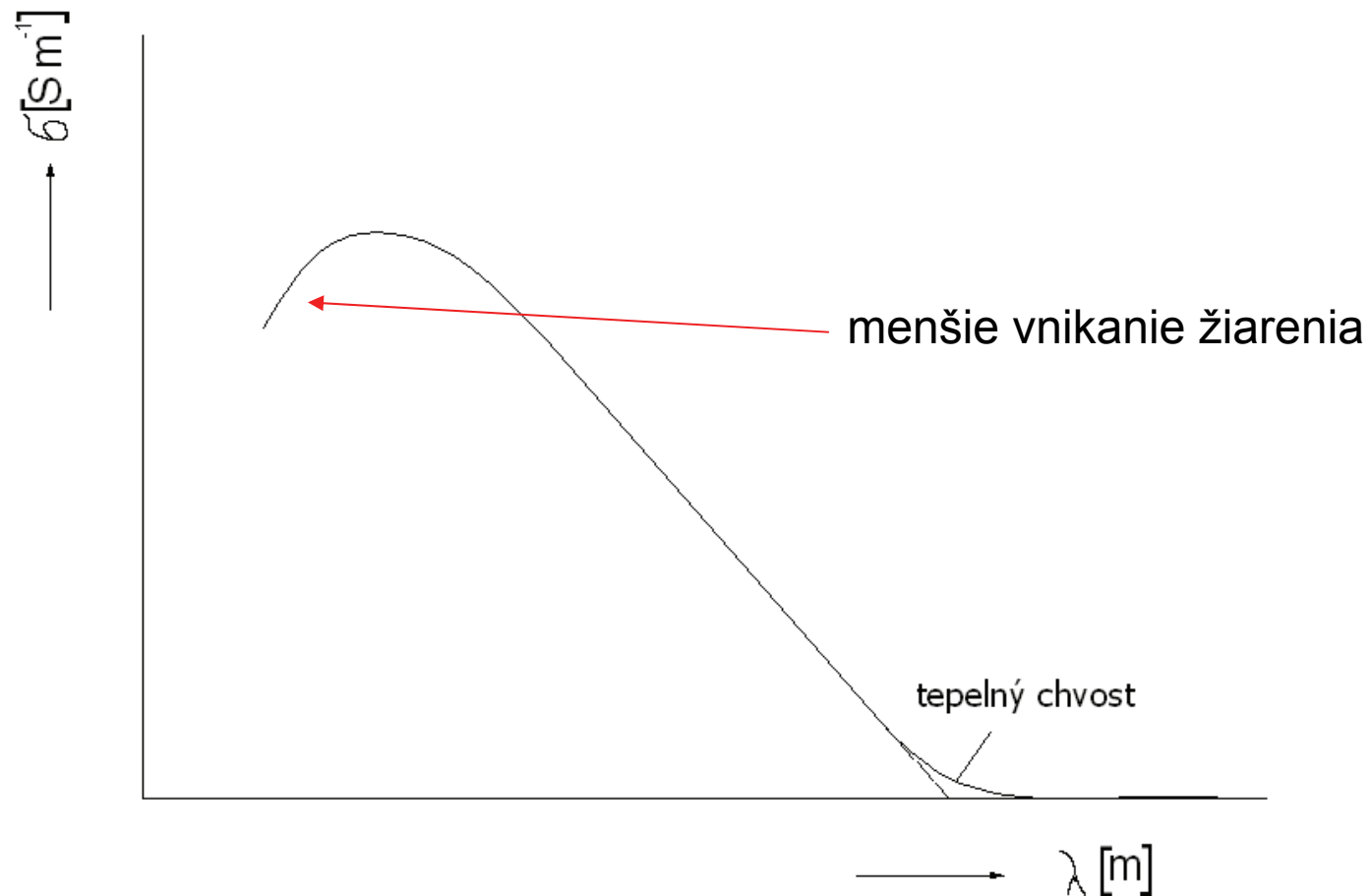
$g_f [\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}]$  fotoelektrický generačný koeficient,

$\tau_{\check{z}} [\text{s}]$  doba života minoritných nosičov

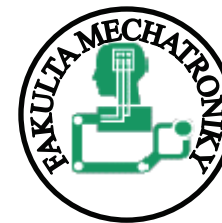
# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Vnútrotný fotoelektrický jav



# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



Vonkajší fotoelektrický jav

Vystupovanie el. z látky v dôsledku jej ožiarenia (osvetlenia), (absorbovaná en. musí byť väčšia ako je en. potrebná na uvoľnenie el.) Materiál opustia len tie el., ktoré zložka rýchlosti v okamihu pohlcovania fotónov smeruje kolmo na povrch materiálu. Využitie : fotonásobiče, fotokatódy

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



Fotovoltický jav

Vznik el. napätia v dôsledku ožiarenia (osvetlenia)

Využitie → premena svetelnej en. na elektrickú.

Realizácia → hradlové fotočlánky (PN priechod, styk kovu a polovodiča .....

Pri nulovom zaťažení vznikne na osvetlenom PN priechode fotoel. napätie  $U_{f0}$

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch

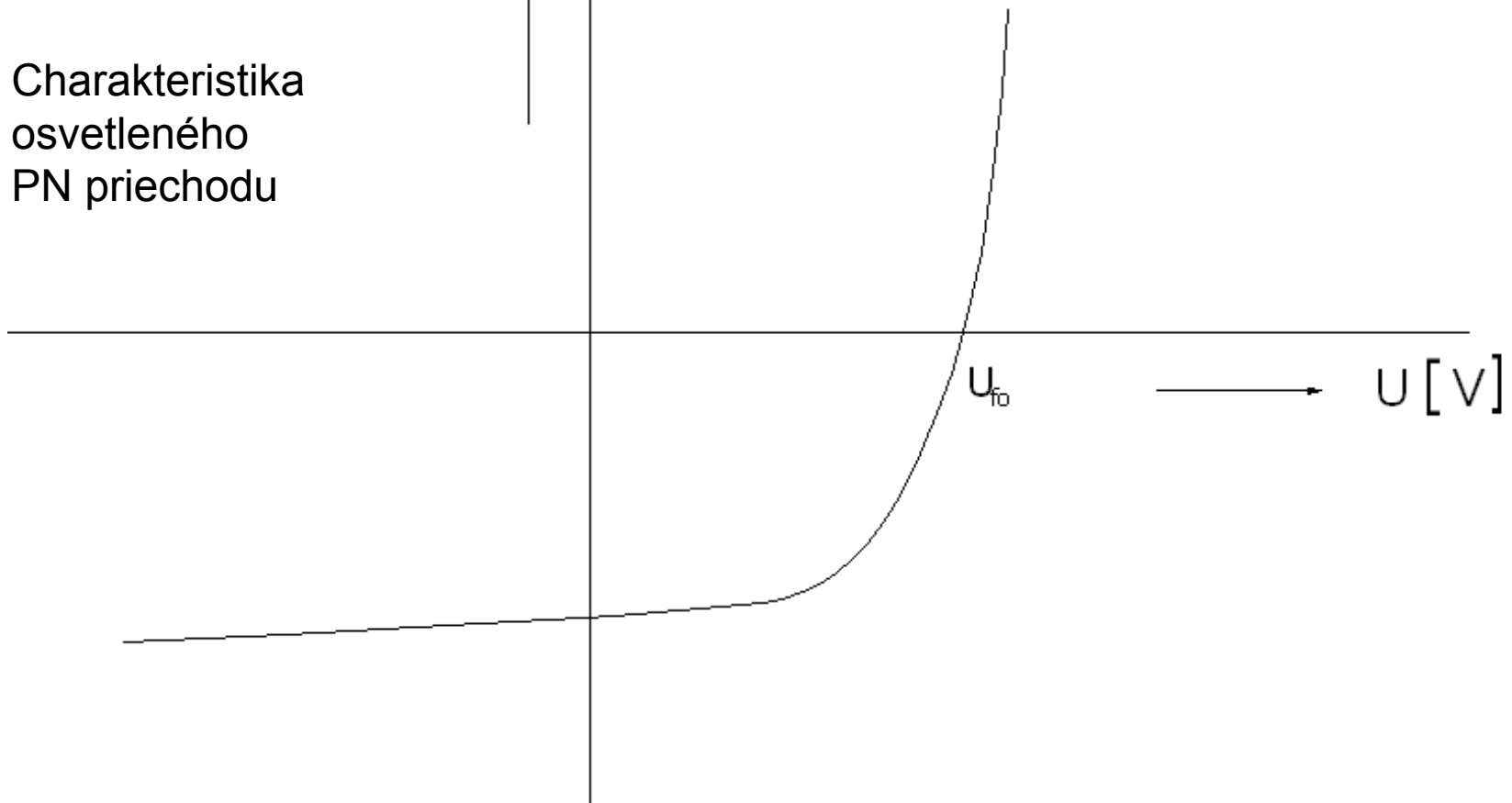


Fotovoltický jav

$I$  [A]



Charakteristika  
osvetleného  
PN priechodu





# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



Luminiscenčné javy

Vyžarovanie el. mg. žiarenia látkou následkom rozličných vonkajších vplyvov.

Príčina: priamy prechod el. na nižšie dovolené en. hladiny

# 1.1 Úvod – Základné fyzikálne javy v polovodičoch



## Luminiscenčné javy

Vonk. vplyv: el. pole (elektroluminiscencia)  
ožiarenie (osvetlenie) (fotoluminiscencia)  
obrazovky ← následkom dopad. el. (katódoluminiscencia)  
chemické reakcie (chemiluminiscencia)  
trenie látky (triboluminiscencia)

vyskytuje sa v látkach nazvaných luminofory = polovodiče so širokým zakázaným pásmom

Parameter: čas zániku luminiscencie po zrušení príčiny:

čas  $\leq 10^{-8}$  s  $\rightarrow$  fluorescencia  
 $> 10^{-8}$  s  $\rightarrow$  fosforescencia



## 1.2 Polovodivé materiály

Elementárne polovodiče

(kremík, germánium, selén...)

Zlúčeniny

(arzenid gália, antimonid india)

Silná závislosť vlastností od : koncentrácie a druhu prímiesí, štruktúry, teploty, ožiarenia, el. a mg. poľa, tlaku...

# 1.2 Polovodivé materiály

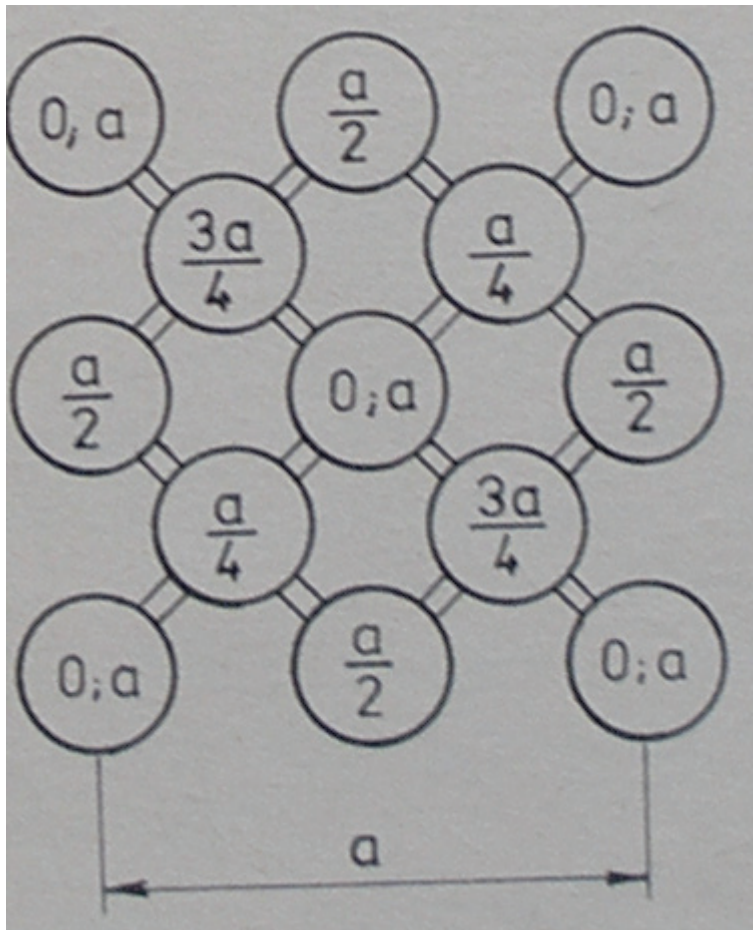
## Elementárne polovodiče

		protónové číslo	šírka zakázaného pásma	
5	B	1,39 eV		Bór
6	C	5,6		Uhlík
14	Si	1,12		Kremík
32	Ge	0,66		Germánium
50	Sn	0,09		Cín (šedý cín)
15	P	1,5 (2,1)		Fosfor
33	As	1,2		Arzén
51	Sb	0,11		Antimón
16	S	2,6		Síra
34	Se	1,8		Selén
52	Te	0,34		Telúr

# 1.2 Polovodivé materiály

## Elementárne polovodiče

Kremík – „diamantová“ mriežka



mriežková konštanta:  $a = 0,543 \text{ nm}$

vzdialenosť susedných atómov:  $0,234 \text{ nm}$



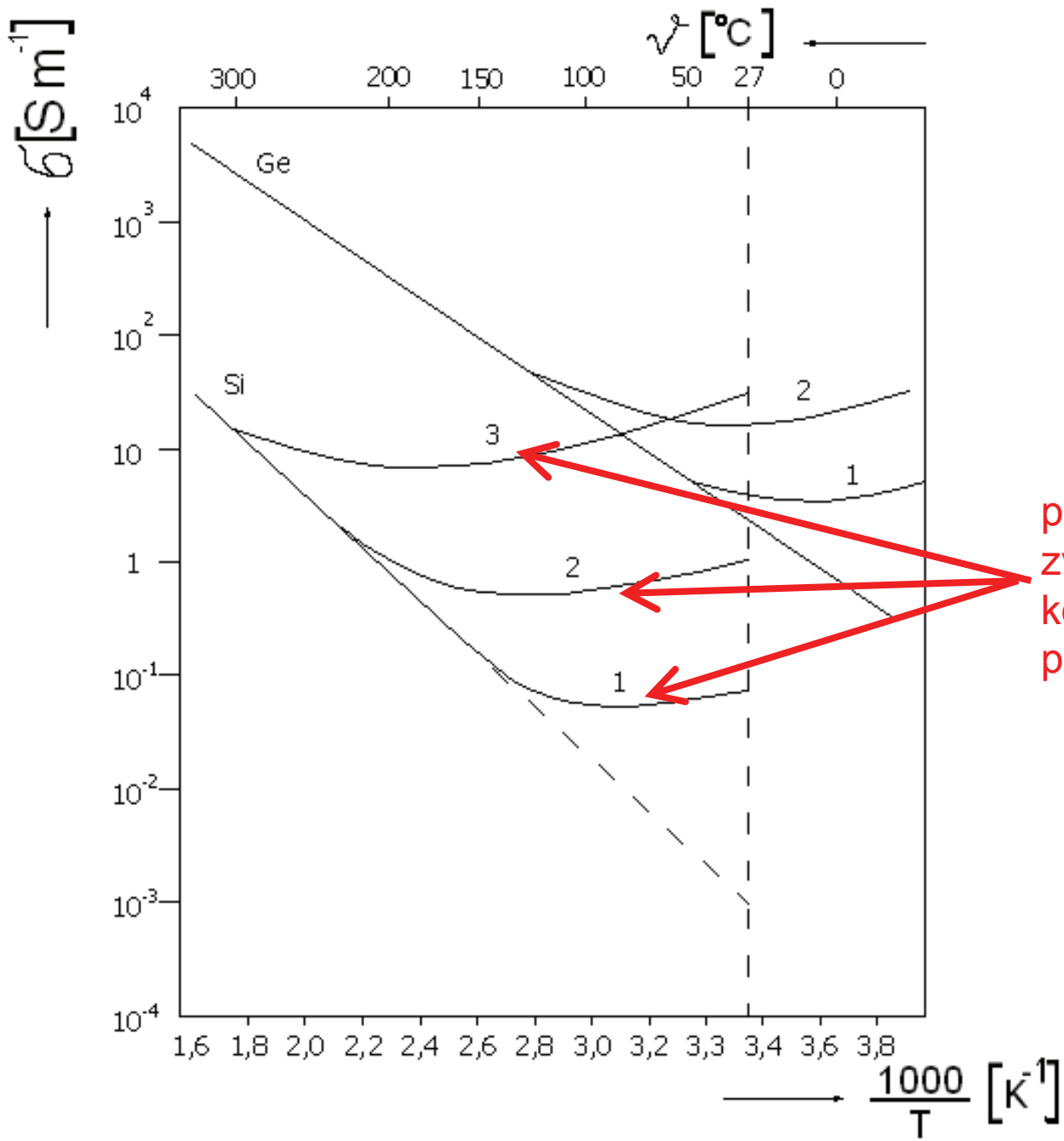


# 1.2 Polovodivé materiály

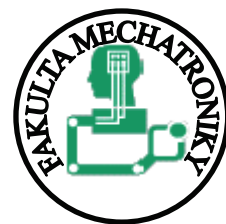
## Elementárne polovodiče

	Si	Ge	GaAs
protónové číslo	14	32	31 - 33
mriežková konštanta $a$ [nm]	0,543	0,566	0,566
vzd. susedných atómov [nm]	0,234	0,244	0,244
koordinačné číslo	4	4	4
počet atómov v element. bunke	8	8	4 + 4
koncentrácia atómov $N$ [m <sup>-3</sup> ]	$4,96 \cdot 10^{28}$	$4,42 \cdot 10^{28}$	$2 \times 2,21 \cdot 10^{28}$
hmotnosť atómu [kg]	$4,66 \cdot 10^{-26}$	$1,20 \cdot 10^{-25}$	$1,16 \cdot 10^{-25}$ (Ga) $1,24 \cdot 10^{-25}$ (As)
hustota [kgm <sup>-3</sup> ]	2328	5320	5320
teplota tavenia [°C]	1420	937	1238
merná tepelná vodivosť [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	145	64	46
relatívna permitivita	12	16	11
elektrická pevnosť [Vm <sup>-1</sup> ]	$\sim 3 \cdot 10^7$	$\sim 1 \cdot 10^7$	$\sim 4 \cdot 10^7$
intrinzická koncentrácia $n_i$ [m <sup>-3</sup> ]	$1,5 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{19}$	$1,1 \cdot 10^{13}$
$u_n$ [m <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	0,14	0,39	0,85
$u_p$ [m <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	0,05	0,19	0,04
konduktivita $\sigma_i$ [Sm <sup>-1</sup> ]	$4,5 \cdot 10^{-4}$	2,23	$1,57 \cdot 10^{-6}$
prah fotocitlivosti $\lambda_f$ [μm]	1,11	1,88	0,87
šírka zakázaného pásma $\Delta W_z$ [eV]	1,12	0,66	1,43

## 1.2 Polovodivé materiály



postupne sa zvyšujúca koncentrácia prímiesí





## 1.2 Polovodivé materiály

Elementárne polovodiče – Kremík

Diamantová kryštalická mriežka (2 plošne centrované kubické mriežky navzájom posunuté v smere telesovej uhlopriečky). Má 14 elektrónov, z toho 4 valenčné.

Kremík tvorí cca 16,7% zo všetkých prvkov zemskej kôry, čistý sa však nevyskytuje, často je  $\text{SiO}_2$  (kremeň)



## 1.2 Polovodivé materiály

### Elementárne polovodiče – Kremík

Výroba: uvoľnenie z  $\text{SiO}_2$  (kremičitý piesok) pri teplote  $1000^\circ\text{C}$  uhlíkom  $\rightarrow$  vznikne „ferosilícium“ (0,5% Fe, 0,5% Al, 0,5% Ca + C, P, CU, SB, As a pod.)  $\rightarrow$  spaľovanie v prúde chlóru  $\rightarrow$  destilácia a extrakcia  $\rightarrow$  dosiahne sa veľká čistota  $\text{SiHCl}_3$  (trichlórsilán) Prechod el. prúdu  $\rightarrow$  ohrev na  $1000^\circ\text{C}$   $\rightarrow$  polykryštalické valce s priemerom do 10 cm  $\rightarrow$  fyzikálne čistenie + výroba monokryštálu.

Výroba: diódy, tranzistory, tyristory, integr. obvody a pod.





## 1.2 Polovodivé materiály

### Elementárne polovodiče – Kremík

Šírka zakázaného pásma	$\Delta W_z = 1,12 \text{ eV} (1,16 \text{ eV pri } 0 \text{ K})$
Koncentrácia atómov	$N = 4,96 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$
Hustota	$\rho = 2328 \text{ kg m}^{-3}$
Teplota tavenia	$1420^\circ\text{C}$
Relat. permitivita	$\epsilon_r = 12$
Koncentr. vl. nos. náboja	$n_i = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$
Konduktivita	$\sigma_i = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ Sm}^{-1}$
Vzdial. susedných atómov	$0,234 \text{ nm}$
Hmotnosť atómu	$4,66 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$
Pohyblivosť elektrónov	$u_n = 0,14 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Pohyblivosť dier	$u_p = 0,05 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$





## 1.2 Polovodivé materiály

### Elementárne polovodiče – Kremík

#### Donory:

fosfor: (aktivačná energia  $\Delta W_D = 0,045 \text{ eV}$ )

arzén ( $\Delta W_D = 0,049 \text{ eV}$ )

antimón ( $\Delta W_D = 0,039 \text{ eV}$ )

lítium ( $\Delta W_D = 0,033 \text{ eV}$ )

#### Akceptory:

indium ( $\Delta W_A = 0,16 \text{ eV}$ )

bór ( $\Delta W_A = 0,045 \text{ eV}$ )

gálium ( $\Delta W_A = 0,065 \text{ eV}$ )

hliník ( $\Delta W_A = 0,057 \text{ eV}$ )



## 1.2 Polovodivé materiály

### Elementárne polovodiče – Germánium

Použitie: vf tranzistory, lacné tranzistory spotrebnej elektroniky, dozimetria

Šírka zakázaného pásma	$\Delta W_z = 0,66 \text{ eV}$ (0,75 eV pri 0 K)
Koncentrácia atómov	$N = 4,42 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$
Hustota	$\rho = 5320 \text{ kg m}^{-3}$
Teplota tavenia	937°C
Relat. permitivita	$\epsilon_r = 16$
Koncentr. vl. nos. náboja	$n_i = 2,4 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Konduktivita	$\sigma_i = 2,23 \cdot 10^{-4} \text{ Sm}^{-1}$
Vzdial. susedných atómov	0,244 nm
Hmotnosť atómu	$1,20 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$
Pohyblivosť elektrónov	$u_n = 0,39 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Pohyblivosť dier	$u_p = 0,19 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$



## 1.2 Polovodivé materiály

### Elementárne polovodiče – Germánium

Donory:

fosfor: (aktivačná energia  $\Delta W_D = 0,012 \text{ eV}$ )

arzén ( $\Delta W_D = 0,013 \text{ eV}$ )

antimón ( $\Delta W_D = 0,0096 \text{ eV}$ )

Akceptory:

indium ( $\Delta W_A = 0,011 \text{ eV}$ )

bór ( $\Delta W_A = 0,01 \text{ eV}$ )

gálium ( $\Delta W_A = 0,011 \text{ eV}$ )

hliník ( $\Delta W_A = 0,01 \text{ eV}$ )



## 1.2 Polovodivé materiály

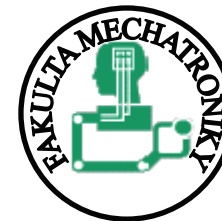
### Elementárne polovodiče – Selén

prvý známy polovodič → 1886: prvý usmerňovač

v polovodičovej technike: modifikácia s  $\sigma_i = 10^{-3} \text{ Sm}^{-1}$

$$\Delta W_Z = 1,8 \text{ eV}$$

použitie: fotočlánky, usmerňovače, xerografia



## 1.2 Polovodivé materiály

Elementárne polovodiče – Ostatné prvky

Obmedzené použitie → väčšinou ako prímеси alebo zlúčeniny





# 1.2 Polovodivé materiály

## Polovodivé zlúčeniny

- a, skupiny  $A^{III}B^V$
- b, sírniky, selenidy, teluridy,
- c, zlúčeniny prechodných prvkov,
- d, ostatné anorganické zlúčeniny,
- e, chalkogénne sklá (báza: síra, selén telúr)
- f, organické polovodiče



## 1.2 Polovodivé materiály

Polovodivé zlúčeniny - a, skupiny A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>

Arzenid gália  
Antimonid india  
Fosfid india  
Antimonid gália

Najpoužívanejší:

**GaAs - Arzenid Gália**

veľká šírka zak. pásma → použitie až do 400°C, klasické diódy, tranzistory, luminiscenčné diódy, laserové diódy, generátory mikrovln, optoelektronické súčiastky, ...

**InSb – Antimonid India**

Jedna z najmenších širok zakázaného pásma 0,18 eV → vysoká koncentrácia nosičov  $n_i = 1,6 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ , konduktivita =  $2 \cdot 10^4 \text{ Sm}^{-1}$

Malá šírka zakázaného pásma umožňuje fotoelektrický jav až do vlnových dĺžok fotónov okolo 7,5  $\mu\text{m}$  → registrácia infračerveného žiarenia.



## 1.2 Polovodivé materiály

### Polovodivé zlúčeniny – GaAS (arzenid gália)

Šírka zakázaného pásma	$\Delta W_z = 1,43 \text{ eV}$
Koncentrácia atómov	$N = 2 \times 2,21 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$
Hustota	$\rho = 5320 \text{ kg m}^{-3}$
Teplota tavenia	$1238^\circ\text{C}$
Relat. permitivita	$\varepsilon_r = 11$
Koncentr. vl. nos. náboja	$n_i = 1,1 \cdot 10^{13} \text{ m}^{-3}$
Konduktivita	$\sigma_i = 1,57 \cdot 10^{-6} \text{ Sm}^{-1}$
Vzdial. susedných atómov	$0,244 \text{ nm}$
Hmotnosť atómu	$1,16 \cdot 10^{-25} \text{ kg (Ga)}$ $1,24 \cdot 10^{-25} \text{ kg (As)}$
Pohyblivosť elektrónov	$u_n = 0,85 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Pohyblivosť dier	$u_p = 0,04 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$



# 1.2 Polovodivé materiály

## Polovodivé zlúčeniny

b, sírniky, selenidy, teluridy,

CdS = sírnik kademnatý → fotocitlivosť (zmena konduktivity pri osvetlení až o 6 rádov), veľká zotrvačnosť procesov → relatívne nízka max. prípustná frekvencia signálov

$\text{Bi}_2\text{Te}_3$  = telurid bizmutu – termoelektrický javy



# 1.2 Polovodivé materiály

## Polovodivé zlúčeniny

c, zlúčeniny prechodných prvkov

prvky s nezaplnenými orbitalmi: Cr, Fe, Co, Ni ...,  
resp. ich oxidy a sírniky

$\text{Cu}_2\text{O}$  – kysličník meďný = „kuprox“, usmerňovač v r.1926

d, ostatné anorganické zlúčeniny,

$\text{SiC}$  karbid kremíka  $\Delta W_z = 2,9 \text{ eV}$   $\sigma = 10^{-11} - 10^3 \text{ Sm}^{-1}$

$\text{ZnO}$  oxid zinočnatý  $\Delta W_z = 3,2 \text{ eV}$   $\sigma = 10^{-4} - 10^3 \text{ Sm}^{-1}$   
fotoelektrické javy, luminiscencia





# 1.2 Polovodivé materiály

## Polovodivé zlúčeniny

e, chalkogénne nekryštalické polovodiče

chalkogénne sklá, čiže prvky s S, Se, Te v sústavách s inými prvkami

Ide o látky s kovalentnými väzbami s dlhými reťazcami.

Použitie: infračervené žiarenie, sklené vlákna pre lasery, oneskorovacie médiá v ultrazvukovej technike, telefónne spínacie prvky, zobrazovacia technika, záznam informácií...



## 1.2 Polovodivé materiály

### Polovodivé zlúčeniny

f, organické polovodiče

org. látky s elektrónovou vodivosťou  $\Delta W_z = 0,1 - 1 \text{ eV}$

pohyblivosť  $u_n = 10^{-2} - 10^{-6} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$

nízka pohyblivosť ← makromolekulárne látky v ktorých sa elektrón môže pohybovať len pozdĺž reťazcov.

Antracén  $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$

Chlorofyl

Hemoglobín

Proteín

Využitie: modely dejov v živých organizmoch: fotosyntéza, zretie rastlín a pod.

## 1.3 Technológie výroby polovodičov



Príprava objemových monokryštálov

Príprava monokryštalických vrstiev

Príprava polykryštalických polovodičov

Príprava nekryštalických polovodičov

Príprava PN priechodov

# 1.3 Technológie výroby polovodičov



## Príprava objemových monokryštálov

Cieľ: čo najdokonalejšie a najväčšie monokryštály s max. čistotou, prípadne s vopred určeným množstvom prímiesí.

Východiskový materiál: polovodiče vyčistené chemickými metódami (napr. Si a Ge na 99,999%)

# 1.3 Technológie výroby polovodičov



## Príprava objemových monokryštálov

### a) Czochralského metóda – Si Ge GaAs

Princíp: do roztavenej látky sa ponorí monokryšt. zárodok z toho istého materiálu s takou kryštalografickou štruktúrou, akú má mať vypestovaný kryštál. Vyrovná sa teplota a zárodok sa pri pomalom otáčaní vyťahuje z taveniny smerom nahor. Používa sa ochranná atmosféra (argón, vodík) alebo vákuum. Použitím tejto metódy prebieha aj čistenie kryštálu, lebo väčšina prímiesí má tendenciu zostať v kvapalnej fáze. Rozhodujúci je segregáčny (rozdeľovací) koeficient:

$$k = C_S / C_L \quad (\text{koncentrácie nečistôt v tuhej a kvapalnej fáze})$$



# 1.3 Technológie výroby polovodičov

## Príprava objemových monokryštálov

### a) Czochralského metóda – Si      Ge      GaAs

hodnoty segregáčného koeficientu k:

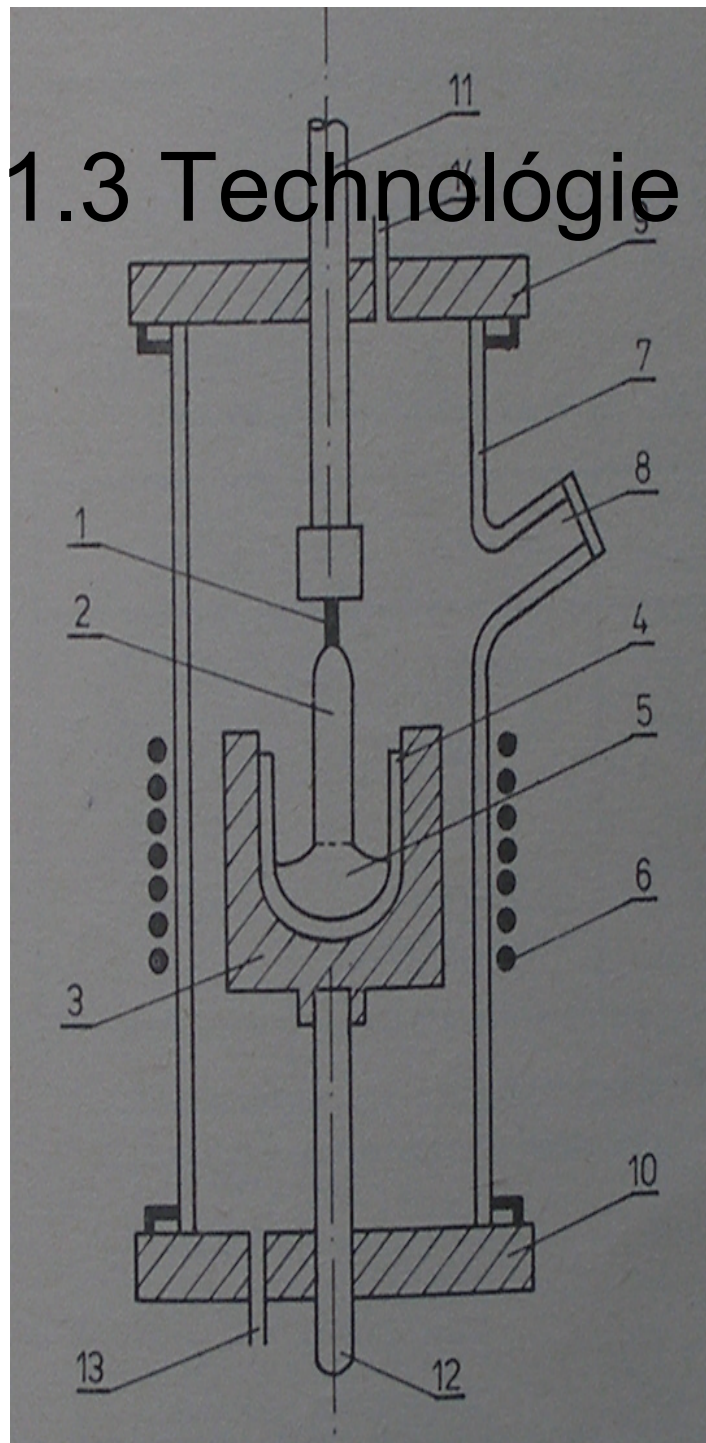
Prvok	Fe	Cu	Au	In	Ga	Al	As	P	B
v Si			$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	0,8
V Ge	$2 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	20

Koncentrácia prímiesí sa mení pozdĺž ťahaného kryštálu, lebo objem kvapaliny sa nepretržite znižuje. Výsledok: cca hyperbolický priebeh koncentrácie nečistôt pozdĺž valca.

# 1.3 Technológia výroby polovodičov

Príprava objemových monokryštálov

a) Czochralského metóda – Si Ge  
GaAs



Zariadenie na ťahanie monokryštálov Czochralského metódou :  
 1 - zárodok, 2 - kryštál, 3 -  
 - grafitový nahrievač, 4 - tég-  
 lik, 5 - tavenina, 6 - induktor,  
 7 - kremenná rúra, 8 - okienko,  
 9 - horná príruha, 10 - dolná  
 príruha, 11 - tyč na ťahanie  
 a otáčanie kryštálu, 12 - tyč  
 na otáčanie téglika, 13 - prí-  
 tok argónu, 14 - odtok argónu

# 1.3 Technológie výroby polovodičov



Príprava objemových monokryštálov

b) zónová rafinácia

pozdĺž tuhého ingotu (= odliatku) sa pohybuje úzka priečne roztavená zóna. Vytvorí sa 2 nárazníkové zóny: taviaca a tuhnúca

Zvyšovaním prechodov zóny sa nečistoty sústredia na konci vzorky, resp. na začiatku → stredná časť sa vyčistí.

Aplikácie a možnosti : príprava extrémne čistého Ge: nečistoty cca  $10^{-8}\%$  po 6 prechodoch



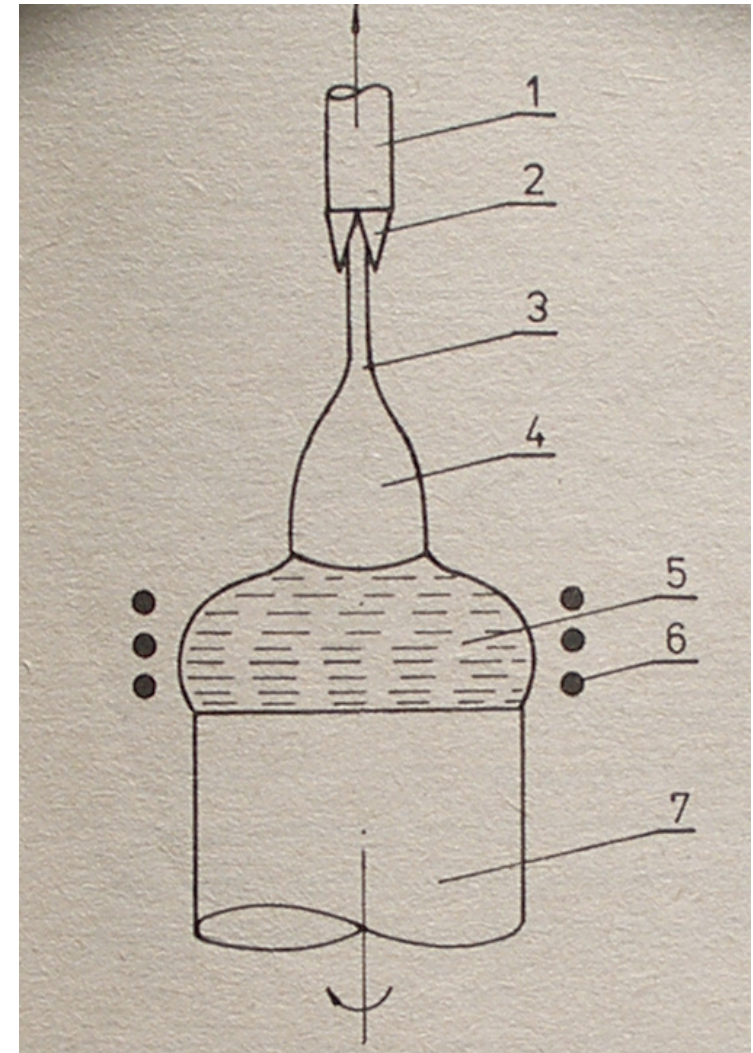
# 1.3 Technológie výroby polovodičov

## Príprava objemových monokryštálov

### b) zónová rafinácia

Piedestálová metóda:

1 - ťažná tyč, 2 - držiak zárodku, 3 - orientovaný monokryštalický zárodok, 4 - vyťahovaný monokryštál, 5 - tavenina, 6 - vf induktor, 7 - východiskový ingot



## 1.3 Technológie výroby polovodičov



Príprava monokryštalických vrstiev

Najvýznamnejšie: epitaxné technológie → možnosť plynulo meniť koncentrácie donorov alebo akceptorov, možnosť vytvárať PN priechody ...

epitaxia z plynnej fázy

epitaxia z kvapalnej fázy

molekulárna epitaxia

# 1.3 Technológie výroby polovodičov



Príprava monokryštalických vrstiev

Stále väčšie využitie polovodičov vo forme vrstiev  
(môžu mať rozličnú hrúbku, štruktúru, ...)

Osobitný význam → vrstvy s monokryštalickou  
štruktúrou = epitaxné



## 1.3 Technológie výroby polovodičov



### Príprava monokryštalických vrstiev

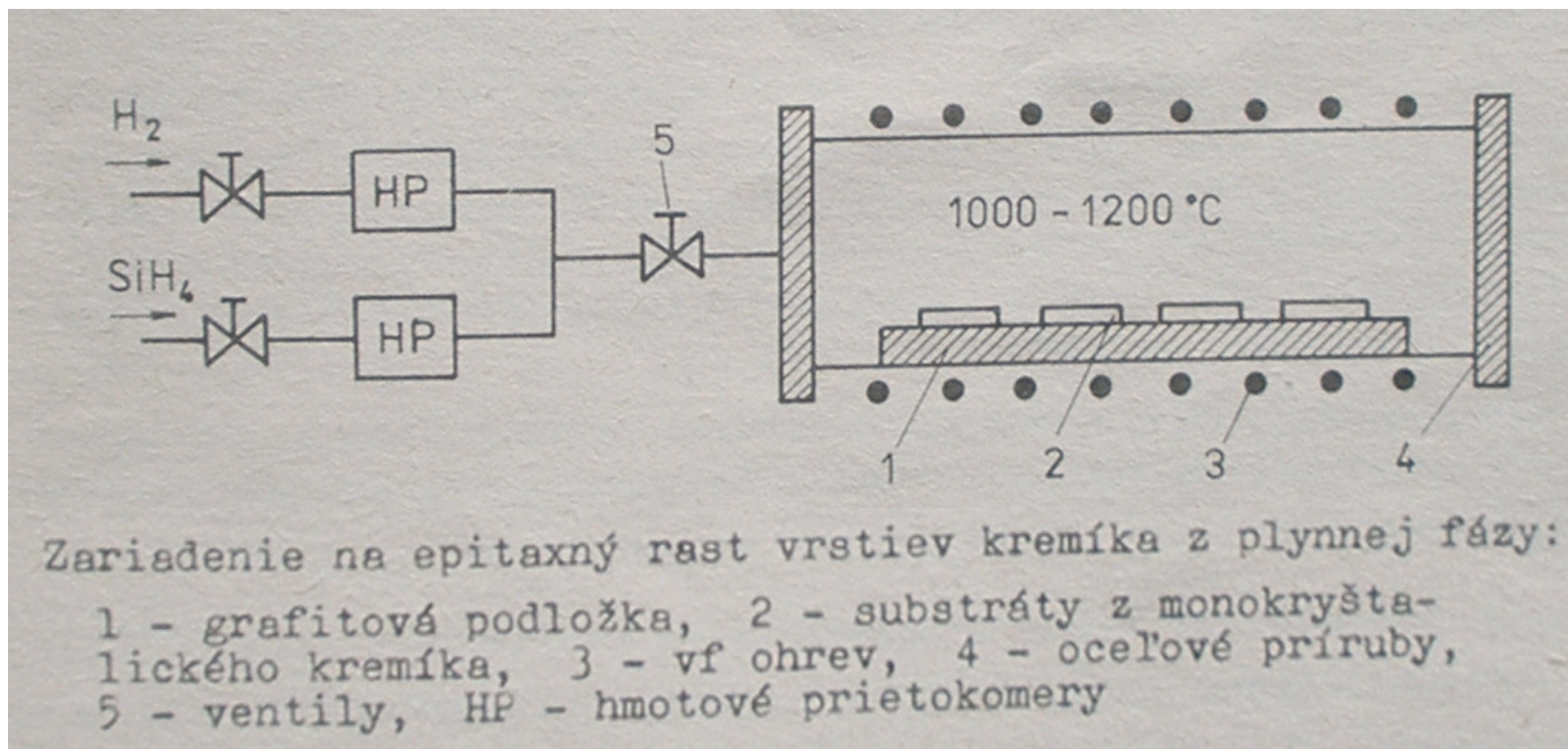
a) epitaxia z plynnej fázy – hrúbka rádovo  $\mu\text{m}$  →  
VPE = Vapour Phase Epitaxy

Transportná chemická reakcia, keď sa do sústavy privádza polovodič A vo forme plynnej zlúčeniny s látkou B (transportné médium). V dôsledku gradientu tlaku sa plyn premiestňuje do oblasti podložky (substrátu), kde pod vplyvom zmeny teploty prebehne reverzná reakcia pri ktorej sa A vylúči vo forme monokryštalickej vrstvy. Rýchlosť rastu je cca desatiny  $\mu\text{m/s}$

# 1.3 Technológie výroby polovodičov

## Príprava monokryštalických vrstiev

### a) epitaxia z plynnej fázy





## 1.3 Technológie výroby polovodičov

Príprava monokryštalických vrstiev

b) epitaxia z kvapalnej fázy LPE – Liquid Phase Epitaxy

Rozpustenie polovodiča vo vhodnom rozpúšťadle → zo získaného nasýteného roztoku začne kryštalizovať rozpustená látka na monokryštalickej podložke vo forme epitaxnej vrstvy.

Princíp: „lodička“ so substrátom sa zaleje roztokom

obr. str. 65

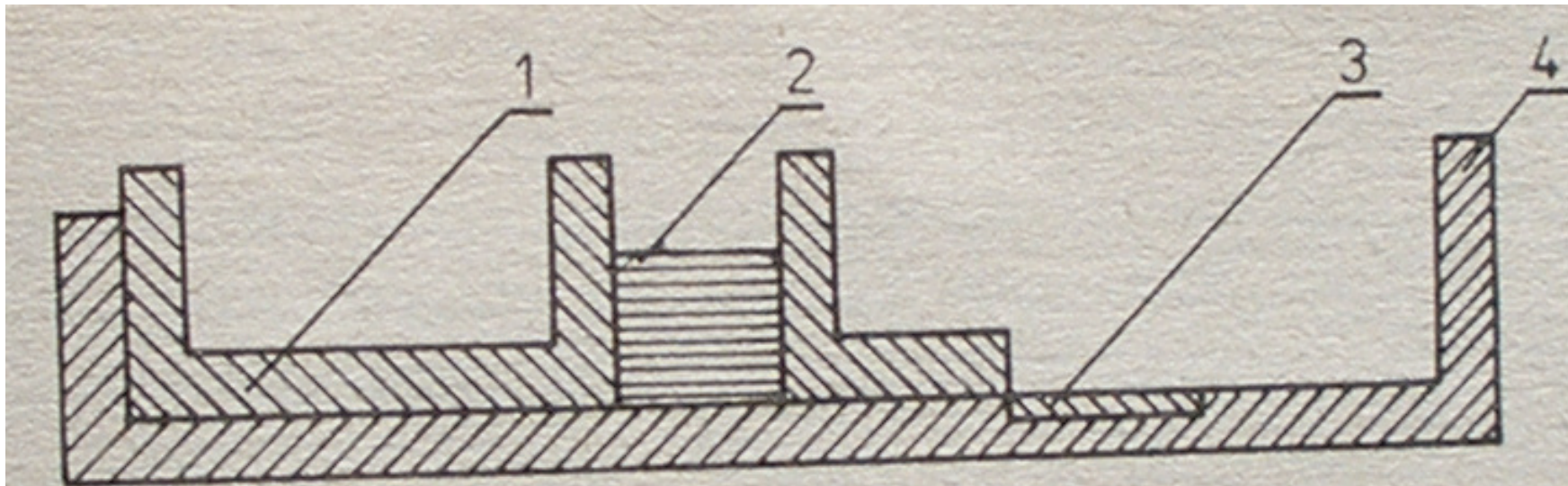
Rýchlosť:  $10^{-2}$  –  $10^{-1}$  mm/s



# 1.3 Technológie výroby polovodičov

## Príprava monokryštalických vrstiev

### b) epitaxia z kvapalnej fázy



System posuvnej lodičky na epitaxný rast vrstiev z kvapalnej fázy: 1 - posuvná časť, 2 - roztok, 3 - substrát, 4 - lodička

## 1.3 Technológie výroby polovodičov



Príprava monokryštalických vrstiev

c) molekulárna epitaxia

Vysoké vákuum + molekulárna reakcia látok  
mimoriadne presné ovládanie hustoty a zloženia

Treba:       zložitá aparatura  
              analýza zvyškových plynov  
              chemická analýza povrchu vzorky a pod.



# 1.3 Technológie výroby polovodičov

## Príprava polykryštalických polovodičov

### **a, odlievanie do blokov**

Tavenie dostatočne čistého kremíka vo vákuu alebo v argóne a odliatie do grafitovej formy, ktorej chladenie znemožní reakciu medzi mater. a formou. Ingot má zreteľnú stĺpcovú štruktúru pozostávajúcu z izolovaných kryštalických oblastí, nasleduje rezania na dosky → finančne náročné

### **b, priame liatie substrátov**

Liatie roztaveného Kremíka cez lievnik na grafitovú alebo kremennú dosku → výroba veľkoplošných kremikových substrátov o hrúbke desatiny mm s priemerom zŕn 10 – 100  $\mu\text{m}$ . Doska je ohriata na cca 700°C

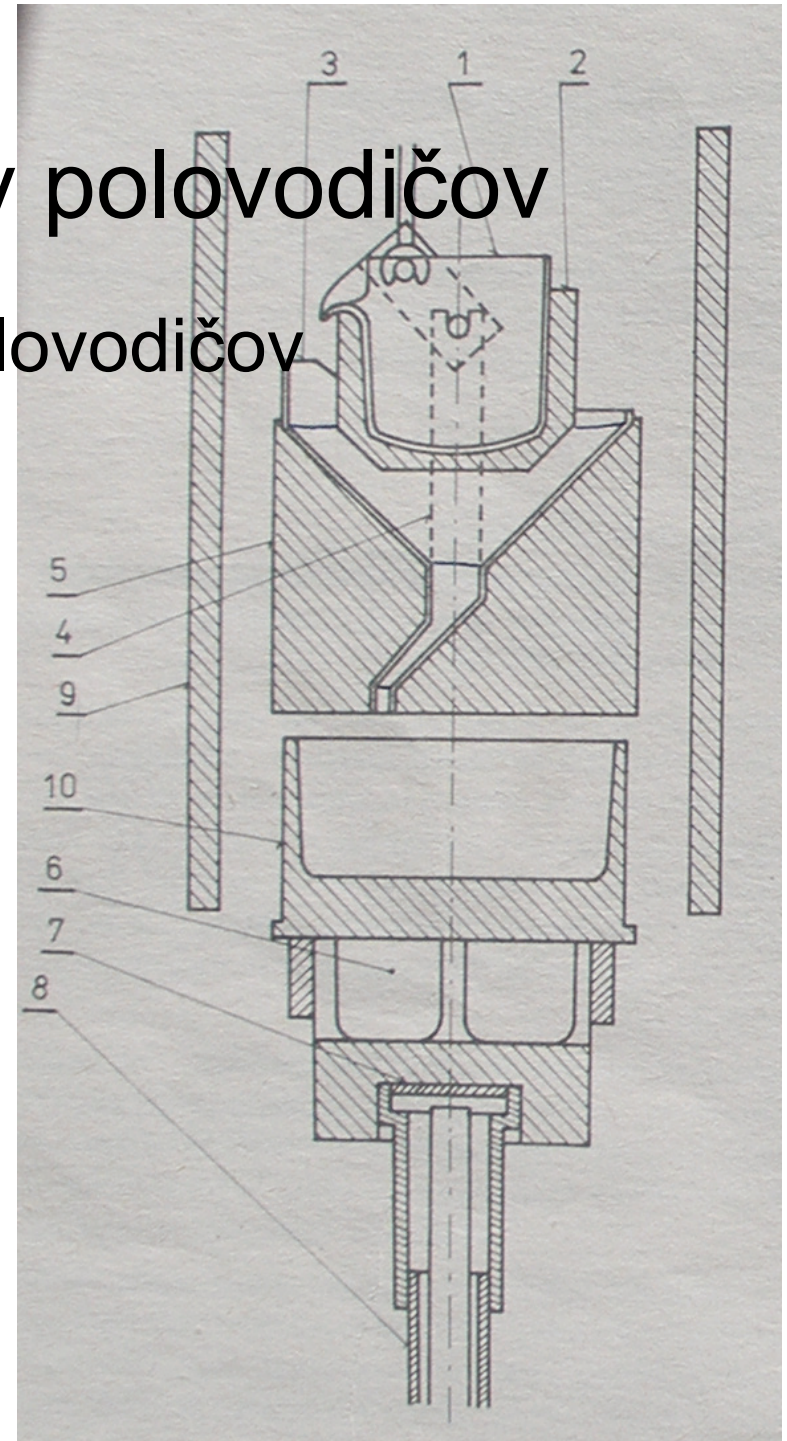
**c) metóda CVD** – Chemical Vapour Deposition, výroba tenkých vrstiev chemickou reakciou

### **d) metódy práškovej metalurgie**

Tabletky z lisovaných práškových, prípadne dodatočne tepelné opracovanie východiskových materiálov. Nevyžaduje sa extrémna čistota. Východiskové suroviny Te (telúr) Bi (bizmut)

# 1.3 Technológie výroby polovodičov

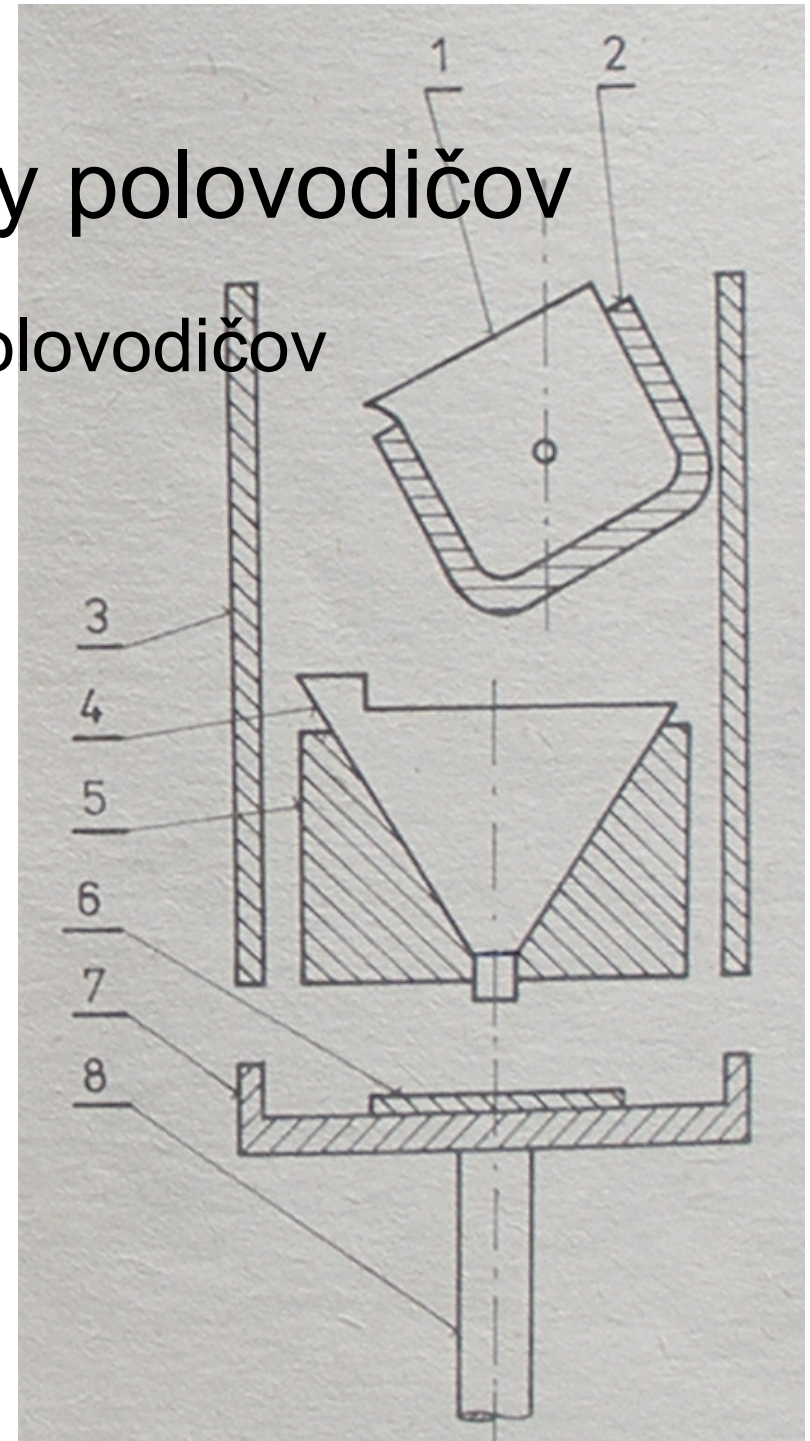
Príprava polykryštallických polovodičov  
*a, odlievanie do blokov*





# 1.3 Technológie výroby polovodičov

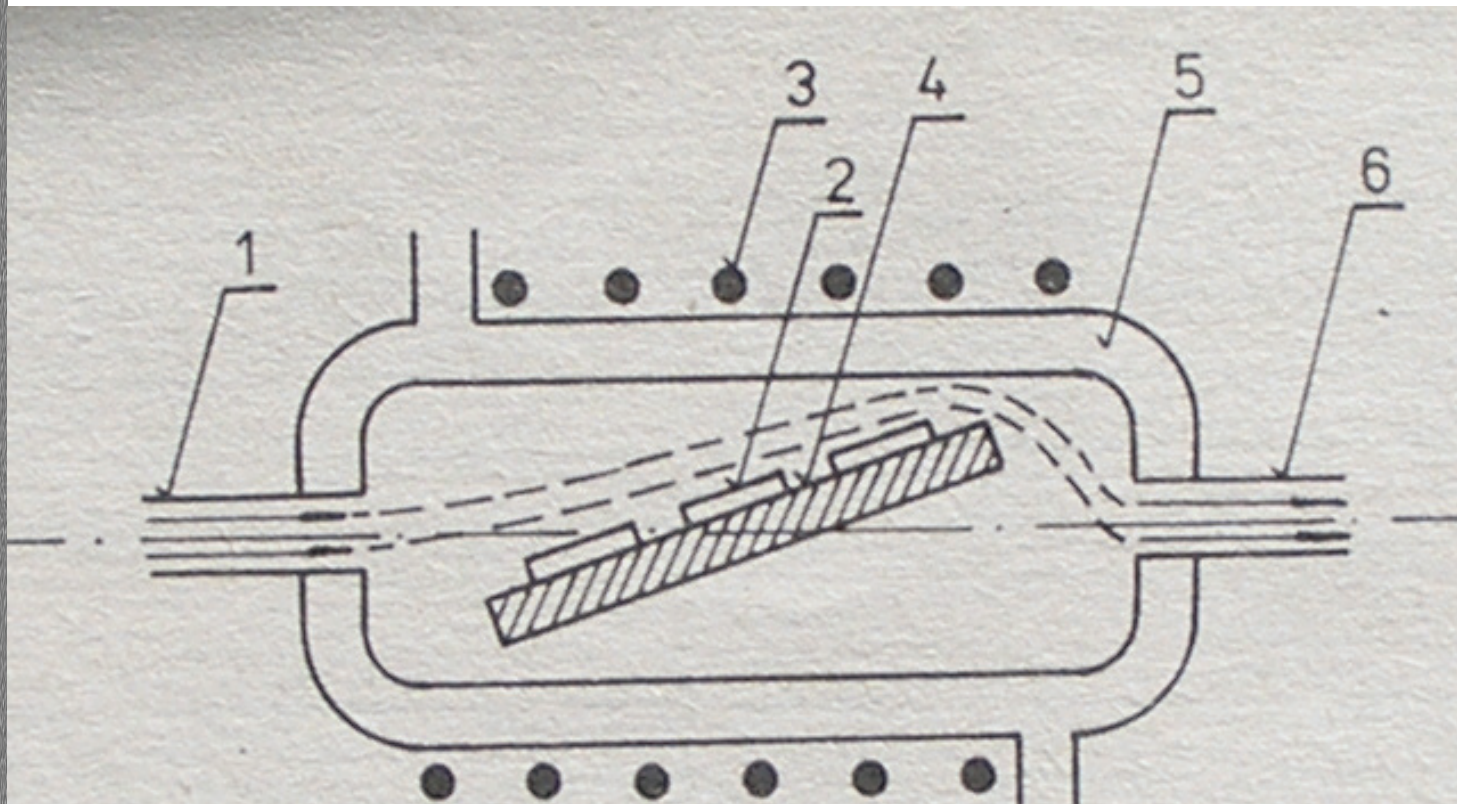
Príprava polykryštalických polovodičov  
*b, priame liatie substrátov*



# 1.3 Technológie výroby polovodičov

## Príprava polykryštalických polovodičov

### c) *metóda CVD* – Chemical Vapour Deposition



Horizontálny reaktor pre metódu CVD:

1 - prívod reagujúcich plynov, 2 - substráty,  
3 - vf ohrev, 4 - držiak, 5 - reaktorová  
rúra, 6 - odčerpávanie zreagovaných plynov



# 1.3 Technológie výroby polovodičov



## Príprava nekryštalických polovodičov

### **a) sklovité polovodiče**

Zatavenie práškovej zmesi daného polovodiča (chalkogénne sklá) do ampulky z kremíka, zahriatie na bod tavenia a následné rýchle ochladenie (zakalením = ponorom do kvapaliny)

### **b) amorfné polovodiče**

Váukové naparovanie = rovnaké ako pri výrobe kryštalických vrstiev, až na to, že podložka sa chladí

Iónové naprašovanie = v jednosmernom alebo tlejivom el. výboji, kladné ióny sú vytrhávané el. poľom a nasmerované na terč (= katóda)



# 1.3 Technológie výroby polovodičov



## Príprava PN priechodov

### ***a) zliatinová (legovacia) technológia***

Zliatina požadovanej prímеси typu *n* alebo *p* s iným prvkom.

Pri zvyšovaní sa teploty sa zliatina roztopí na povrchu polovodiča, potom sa vrstva polovodiča rozpustí v zliatine, ktorej zložky preniknú do polovodiča. Nasleduje chladnutie, pri ktorom vrstva polovodiča so zabudovanou prímесou znovu kryštalizuje. (Na podložku jedného typu sa použije zliatina druhého typu).

# 1.3 Technológie výroby polovodičov



## Príprava PN priechodov

### *b) difúzna metóda*

Odparovanie materiálu v difúznej peci a prenášanie pomocou nosného plynu na povrch ohrievaných kremíkových doštičiek. Zmenou najmä teploty doštičiek možno regulovať rýchlosť difúzie, hĺbku a strmosť priechodu a pod. Vhodná pre hromadnú výrobu.

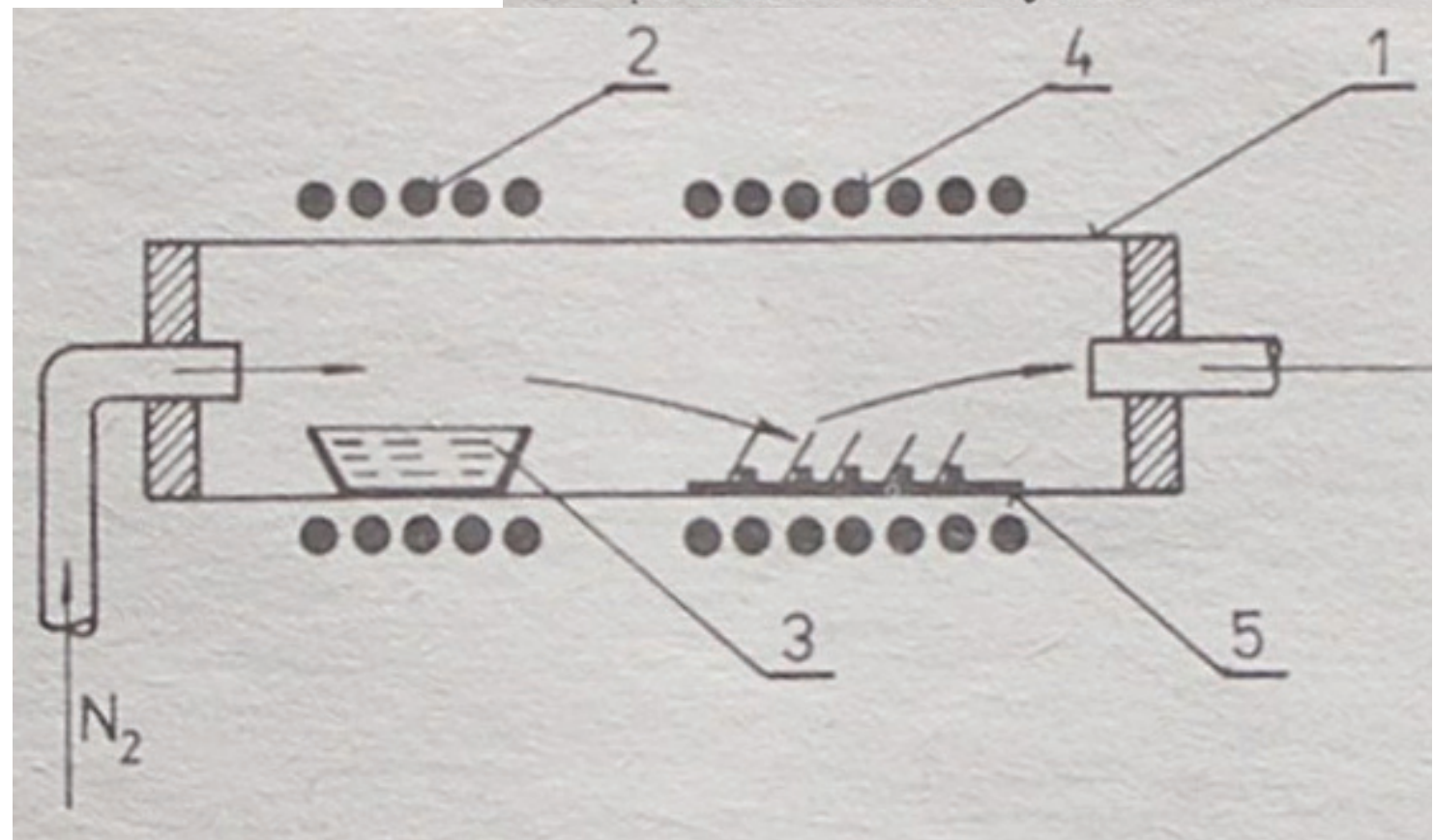
# 1.3 Technológie výroby polovodičov

## Príprava PN priechodov

### b) difúzna metóda

Schéma zariadenia na difúziu fosforu do kremíka:

- 1 - kremenná rúra s nosným plynom ( $N_2$ ),
- 2 - ohrev difúzneho materiálu, 3 - téglik s tuhým difúznym materiálom ( $P_2O_5$ ),
- 4 - ohrev podložky s doštičkou Si,
- 5 - podložka a doštičky Si



# 1.3 Technológie výroby polovodičov



## Príprava PN priechodov

**c) kombinovanie a) + b) = mesa technológia** → neskôr epitaxná technológia

**d) planárna technológia** (umiestnenie všetkých vývodov v jednej rovine), (výroba aj integrovaných obvodov)



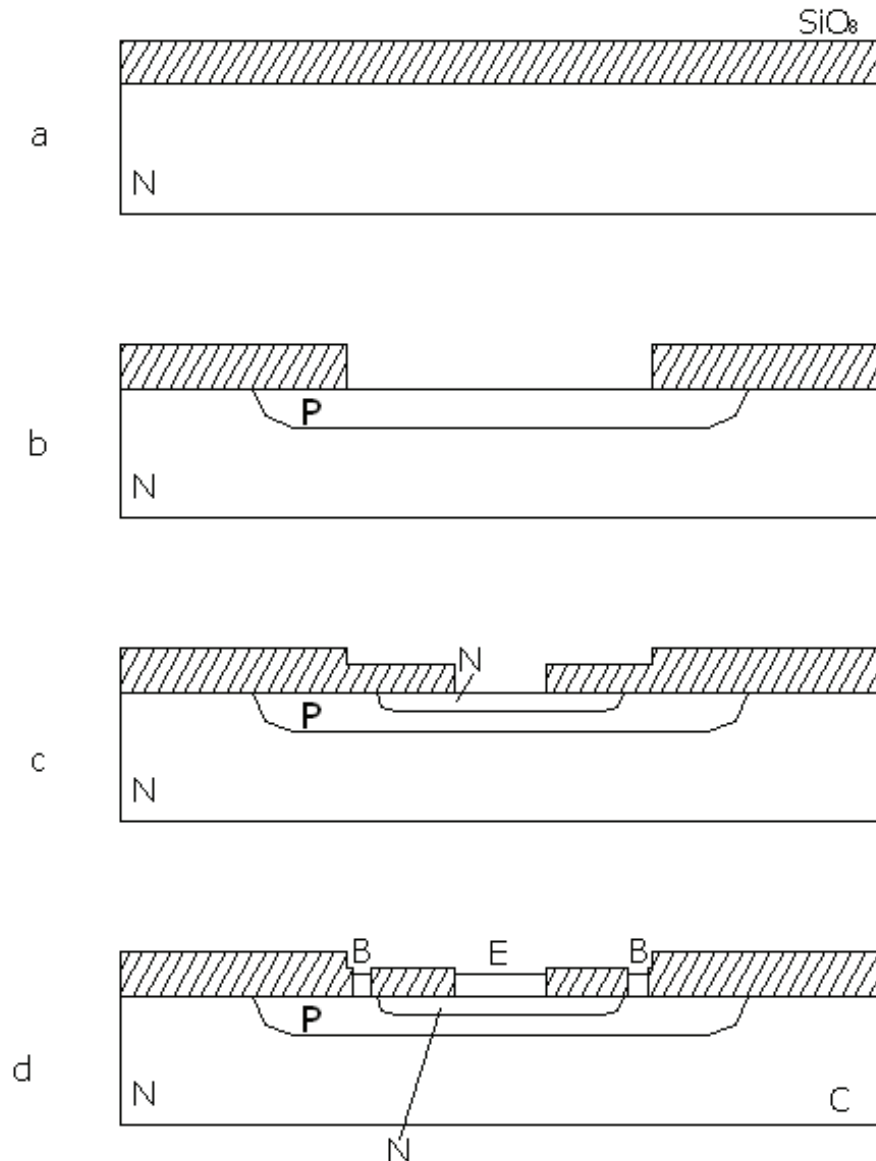
# 1.3 Technológie výroby polovodičov

## Príprava PN priedchodov

### d) *planárna technológia*

- a) vytvor. izol. vrstvy SiO<sub>2</sub>
- b) vytvorenie vrstvy bázy
- c) vytvor. vrstvy emitora
- d) vyleptanie miest pre kontaktovanie bázy a emitora

fotocitlivý povlak → po osvetlení sa zakryté časti ľahko zmyjú, odokryté zostanú





# 1.3 Technológie výroby polovodičov



## Príprava PN priechodov

**e) iónová implantácia** – prímiesové atómy sa dostávajú do materiálu formou prúdu iónov cez vrstvu  $\text{SiO}_2$ . Ióny majú vysokú energiu (rádovo až MeV).

Výhody:

- široký sortiment prímiesí
- rozpustnosť v polovodiči nie je podmienkou

## 2 Izolanty



Nízka konduktivita pri 300 K:

menej ako  $10^{-8} \text{ Sm}^{-1}$

dobré izolanty:  $10^{-12} \text{ Sm}^{-1}$

## 2 Izolanty



Použitie:

zamedzenie prechodu prúdu

Voľné nosiče náboja:

ióny (predprierazové javy)

Viazané nosiče:

polarizácia (dielektrické straty)

Ideálny izolant:

neobsahuje žiadne nosiče náboja

## 2 Izolanty



Elektrická polarizácia

Elektrická vodivosť

Dielektrické straty

Elektrická pevnosť

## 2 Izolanty



Rozdelenie:

Plynné

Kvapalné

Organické tuhé

Anorganické tuhé





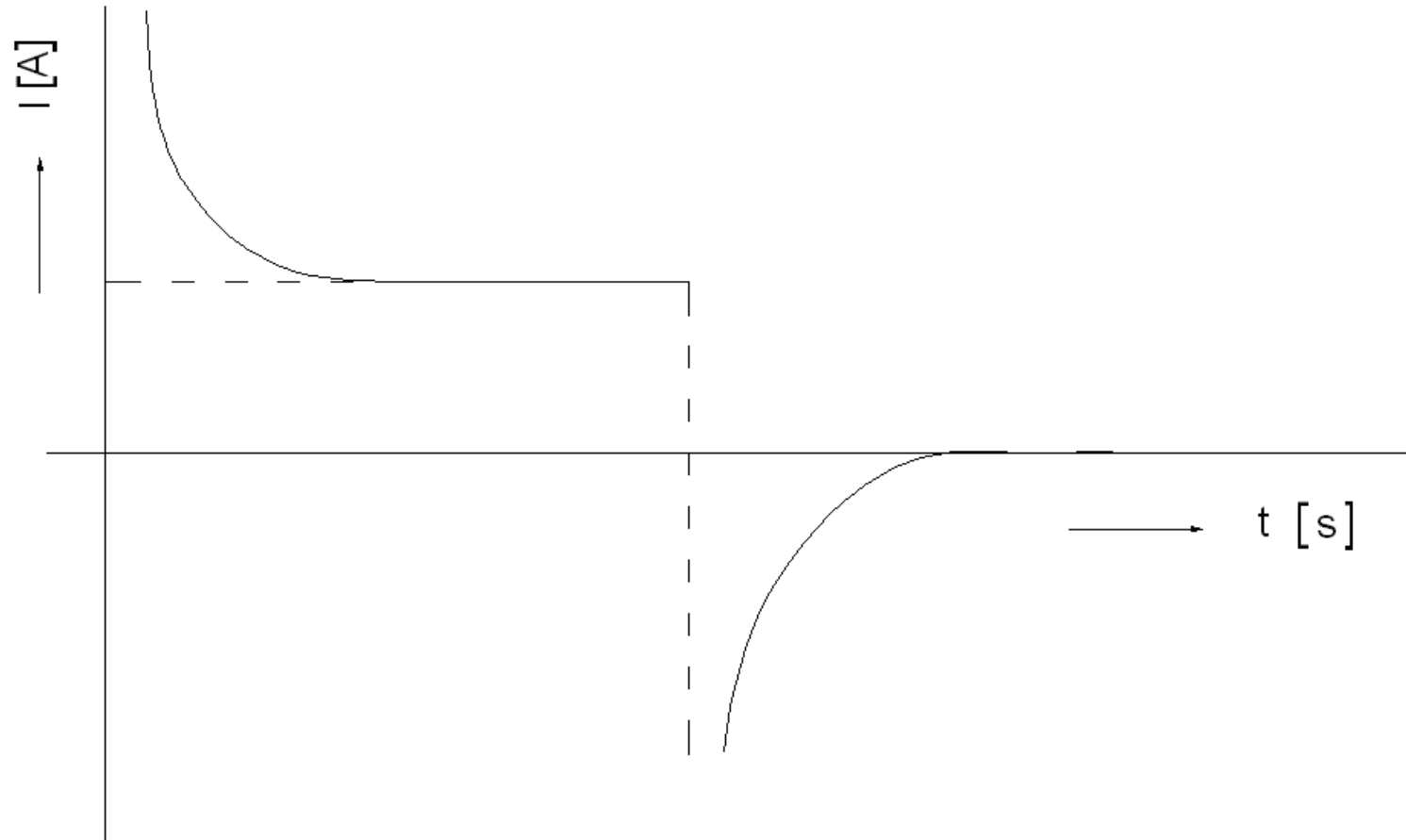
## 2.1 Elektrická polarizácia

Vonkajšie nemenné elektrické pole  $\rightarrow$  pohyb voľných aj viazaných nosičov náboja  $\rightarrow$  prúd s dvomi zložkami:

časovo závislá (polarizačný)

časovo nezávislá (vodivostný = presakujúci)

## 2.1 Elektrická polarizácia





## 2.1 Elektrická polarizácia

Polarizácia:

makroskopicky: objavenie sa viazaných nosičov el. náboja na povrchu → vznik dipólového momentu izolantu

mikroskopicky: pootočenie permanentných dipólových momentov molekúl do smeru el. poľa



## 2.1 Elektrická polarizácia

materiálový parameter: relatívna permitivita  $\epsilon$   
(kvantitatívne vyjadrenie polarizovateľnosti)

lokálne elektrické pole (Lorentz)



## 2.1 Elektrická polarizácia

Druhy elektrickej polarizácie (vzhľadom na mechanizmus pohybu nosičov náboja):

elektrónová

iónová pružná

dipólová

iónová relaxačná

migračná

spontánna samovoľná

rezonančná





## 2.1 Elektrická polarizácia

Elektrónová polarizácia:

deformácia elektrónových orbitalov zapríčinená el. poľom. doba ustálenia:  $10^{-15}$  s  $\rightarrow$  vyskytuje sa pri všetkých frekvenciách použitia a vo všetkých materiáloch. Pružné vychýlenie elektrónov  $\rightarrow$  pružná (deformačná) polarizácia.

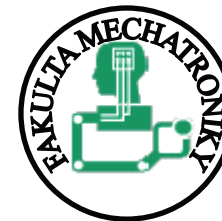
Väčšinou vzniká dipólový moment pohybom elektrónov na vonkajšom orbitale (najslabšia väzba k jadrú)



## 2.1 Elektrická polarizácia

Iónová pružná polarizácia:

pružné vychýlenie iónov z rovnovážnych polôh zapríčinené elektrickým poľom. Typické pre iónové kryštalické látky. Doba ustálenia je  $10^{-13}$  s → vyskytuje sa stále a všade.



## 2.1 Elektrická polarizácia

Dipólová polarizácia:

otáčavý pohyb molekúl s dipólovým momentom zapríčinený elektrickým poľom. Molekuly sa v el. poli snažia zaujať takú polohu, aby smer ich dipólového momentu bol totožný so smerom vonkajšieho poľa. Je spojená s tepelným pohybom molekúl → závisí od teploty.



## 2.1 Elektrická polarizácia

Iónová relaxačná polarizácia:

typická pre iónové sklovité látky (anorganické sklá)  
→ v dutinách materiálu sa nachádzajú ióny → ich pohyb je možný len v rámci týchto dutín.

Vyskytuje sa aj v kryštáloch s vysokým obsahom porúch a v keramických materiáloch.



## 2.1 Elektrická polarizácia

Migračná polarizácia:

vyskytuje sa v nehomogénnych izolantoch, zapríčinená je voľnými nosičmi náboja. V nehomogénnych materiáloch existujú oblasti s rôznou pohyblivosťou voľných nosičov náboja → nerovnaké rozloženie (hromadenie náboja v miestach s nízkou pohyblivosťou) → vznik indukovaného dipólového momentu





## 2.1 Elektrická polarizácia

Spontánna (samovoľná) polarizácia:

vyskytuje sa vo feroelektrikách, v ktorých existujú oblasti s nesymetricky rozloženým el. nábojom (aj bez vplyvu vonkajšieho poľa). Domény vykazujú permanentný dipólový moment.



## 2.1 Elektrická polarizácia

Rezonančná polarizácia:

vyskytuje sa pri časovo sa meniacom el. poli, ktorého frekvencia je blízka frekvencii vlastných kmitov nosičov náboja. Vyskytuje sa v oblasti frekvencií cca  $10^9$  Hz



## 2.1 Elektrická polarizácia

Klasifikácia izolantov podľa polarizácie:

Nepolárne - len elektrónová polarizácia, plynné

Polárne – el. + dipólová, plynné

Iónové kryštalické – el. + iónová pružná

Iónové sklovité – el. + iónová + iónová relaxačná

Feroelektriká – el. + iónová + spontánna



## 2.1 Elektrická polarizácia

Permitivita izolantov  $\epsilon$ :

vyjadrenie polarizovateľnosti,

rozdielne mechanizmy polarizácie pre jednotlivé skupenstvá

závisí od mnohých vonkajších faktorov → nie je to materiálová konštanta!



## 2.1 Elektrická polarizácia

Permitivita plynných izolantov

$$\varepsilon_r \approx 1$$

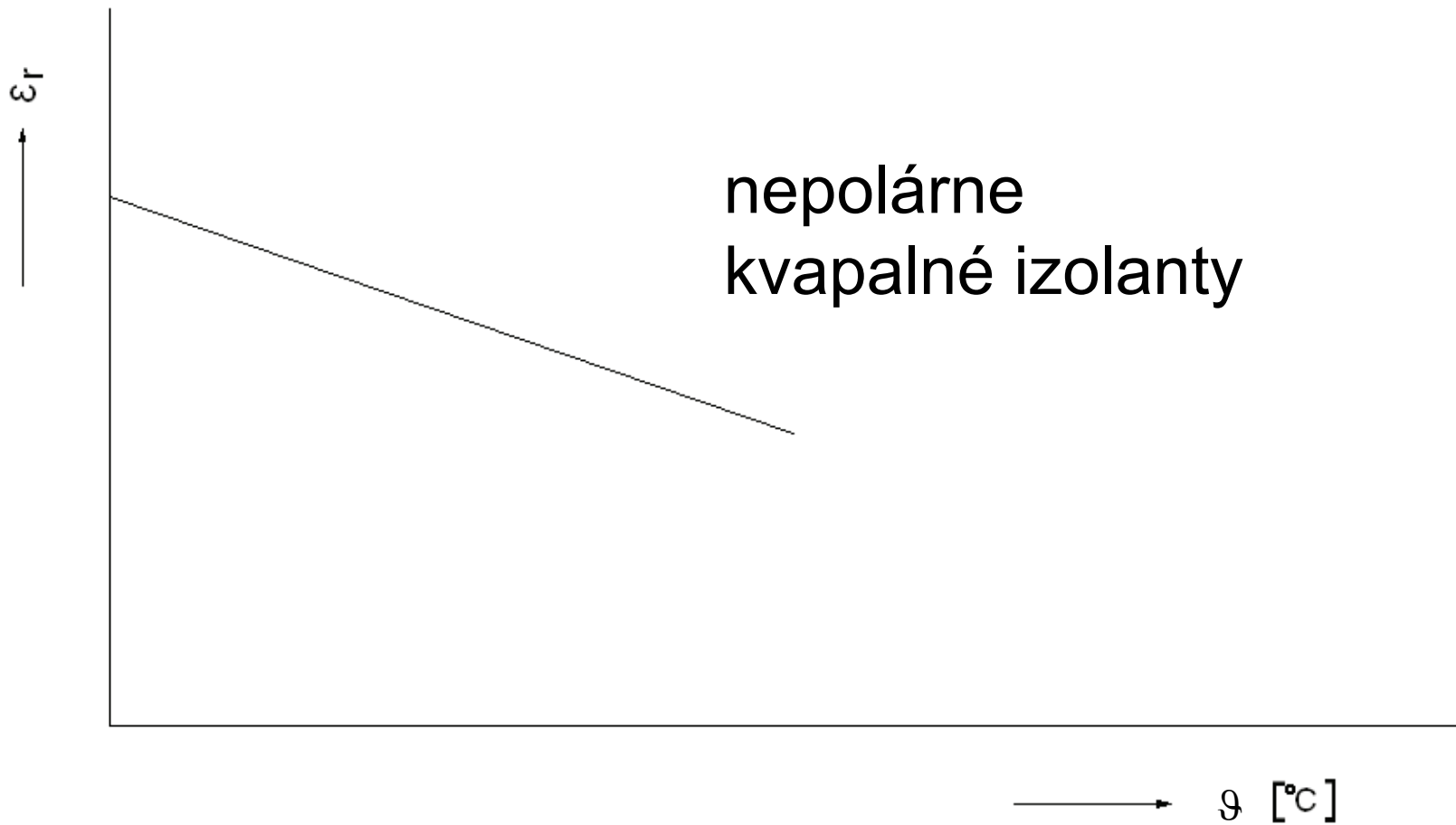
Permitivita kvapalných izolantov

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{n\alpha_e}{3\varepsilon_0} \quad \text{Clausiusova – Mossottiho rovnica}$$

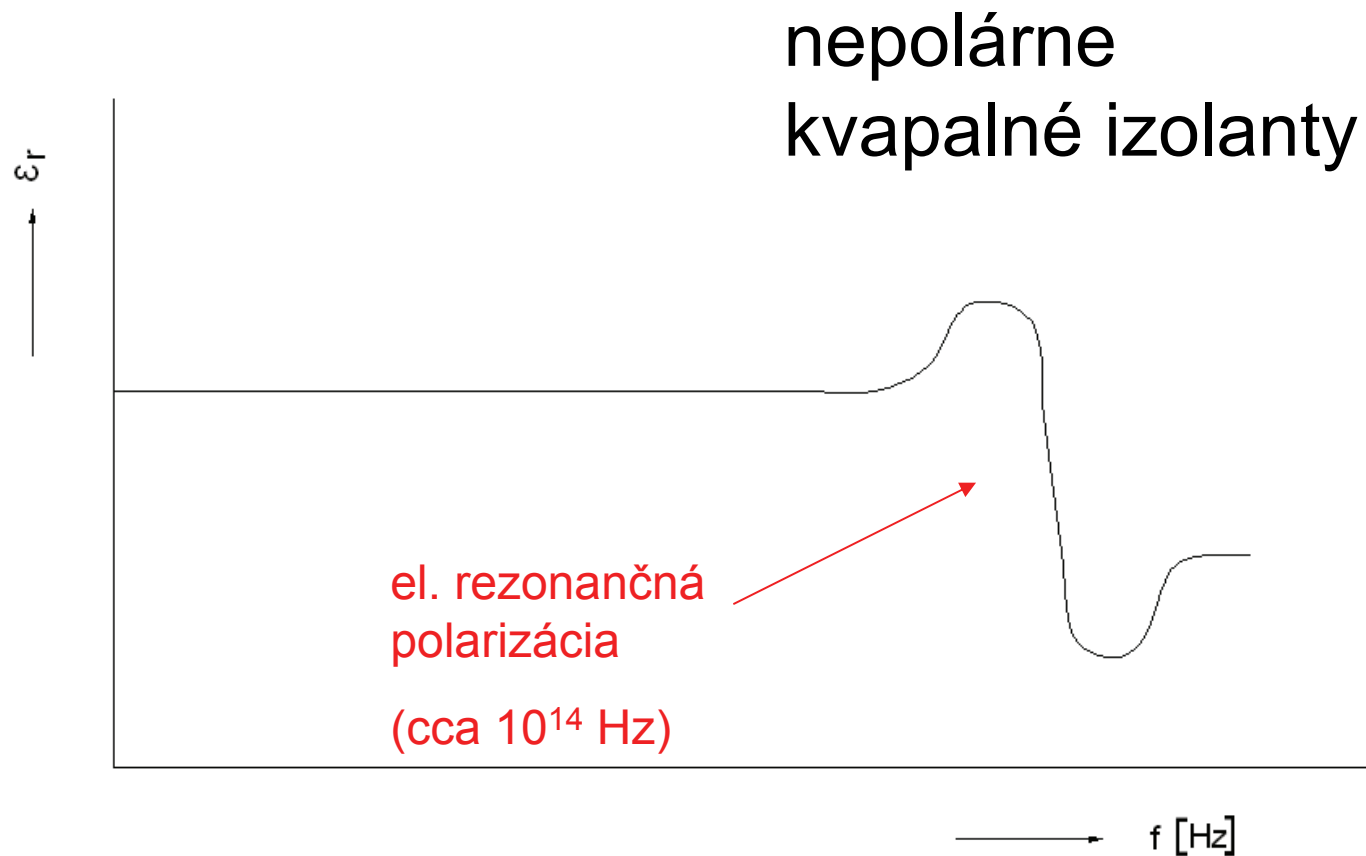
Permitivita tuhých izolantov



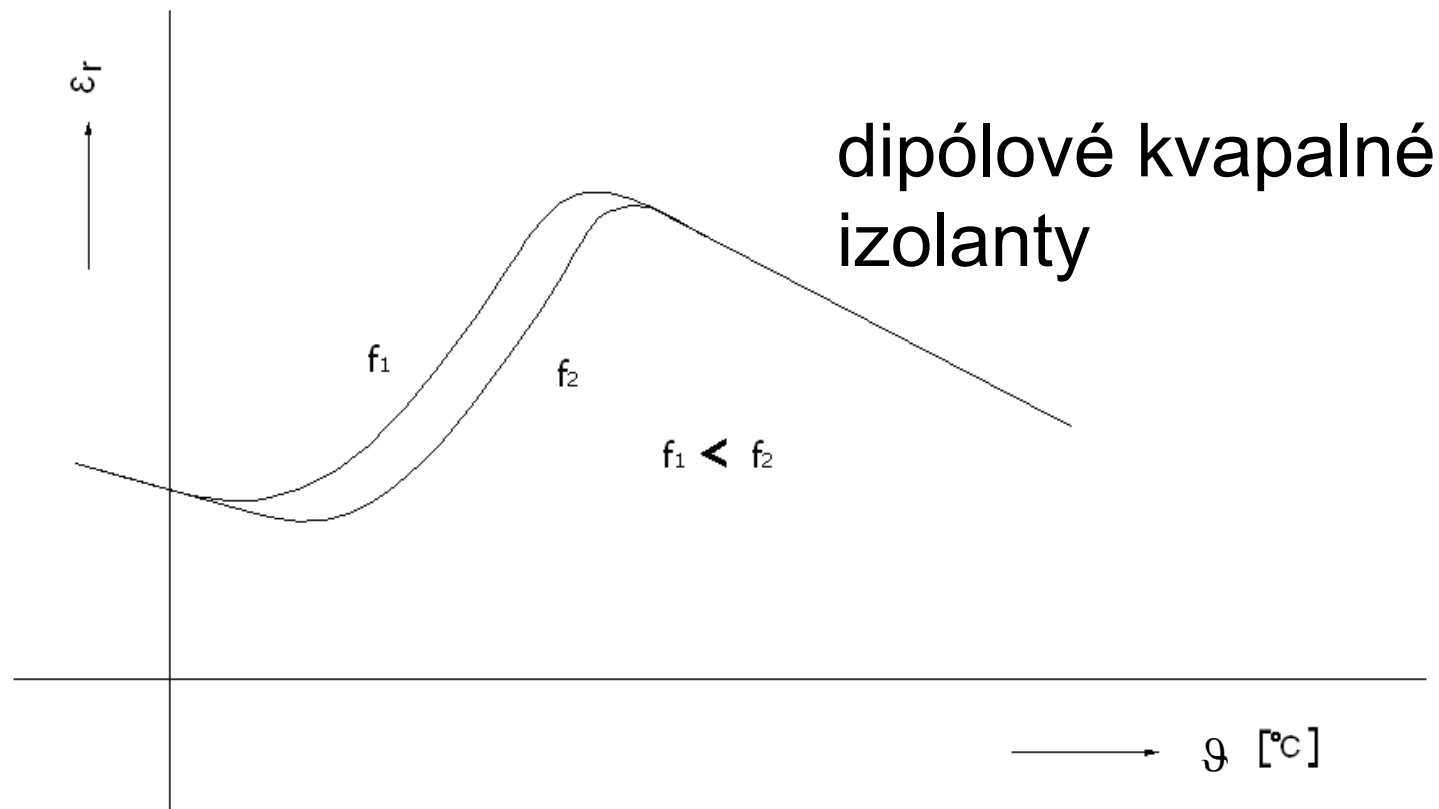
## 2.1 Elektrická polarizácia



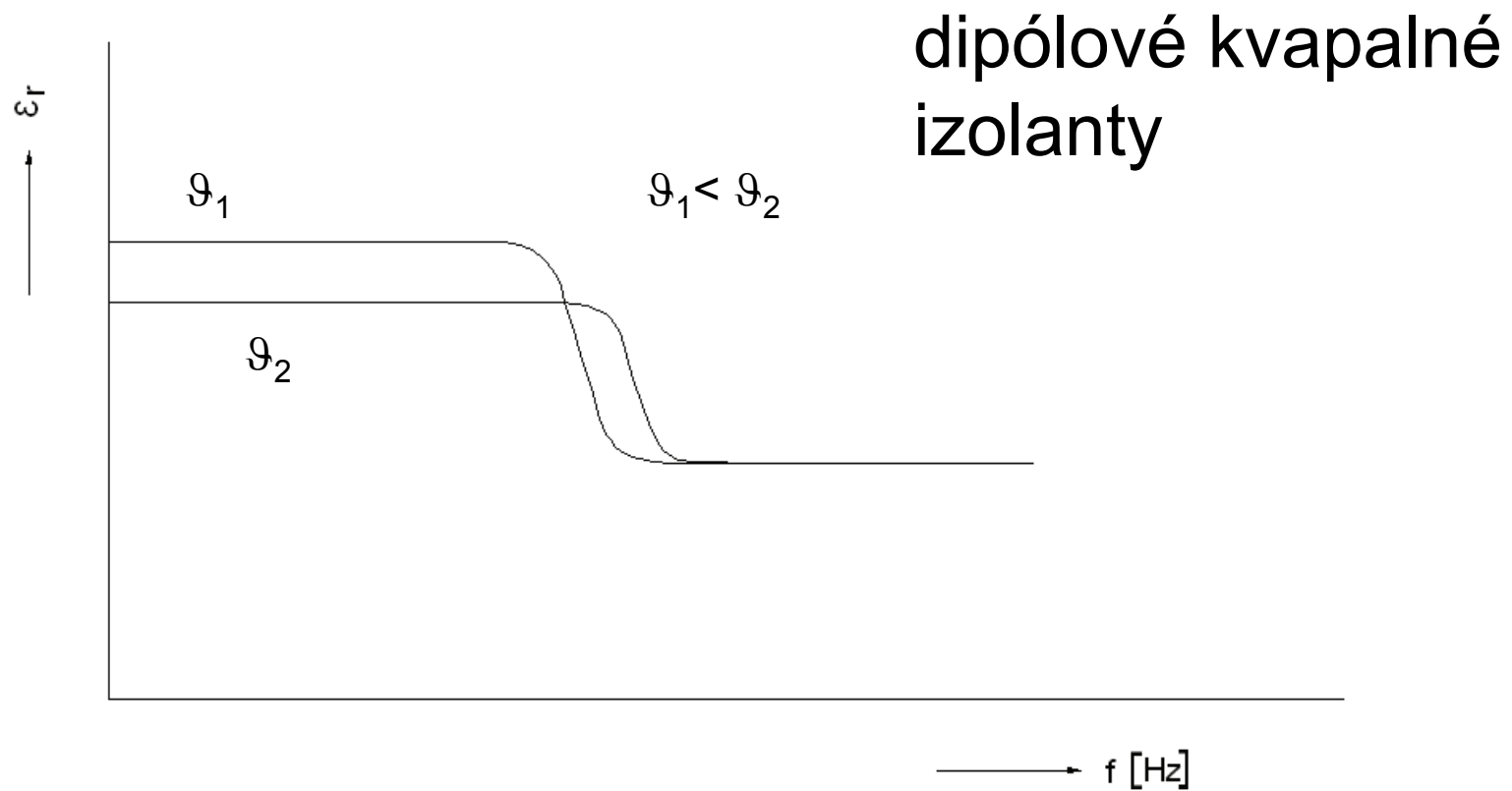
## 2.1 Elektrická polarizácia



## 2.1 Elektrická polarizácia

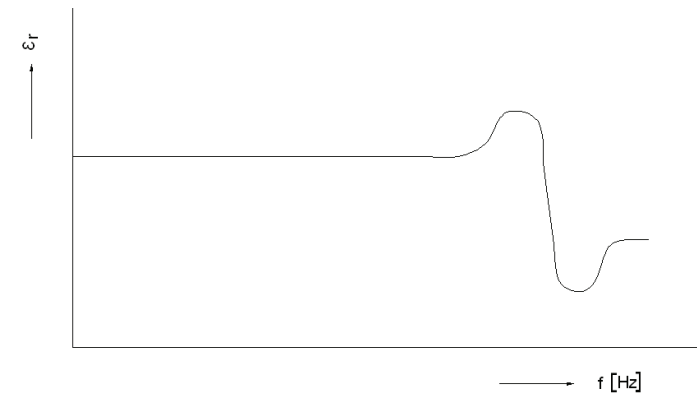
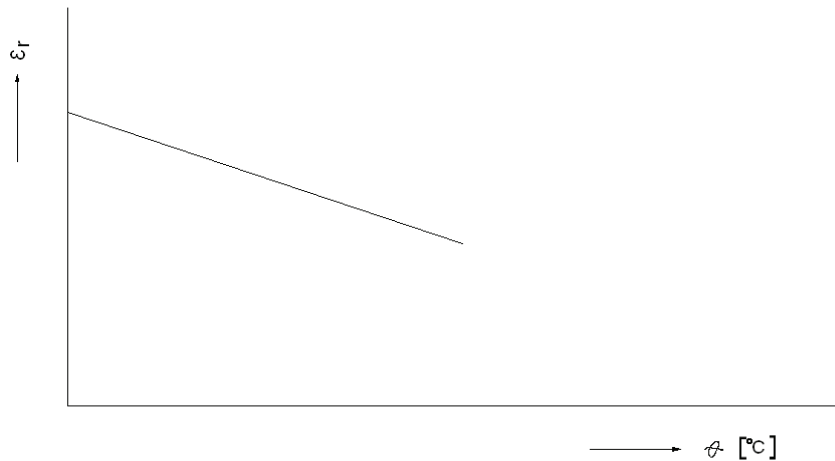


## 2.1 Elektrická polarizácia



## 2.1 Elektrická polarizácia

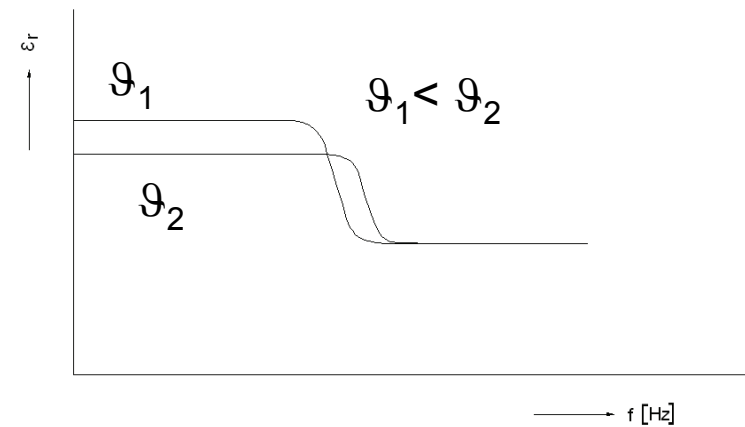
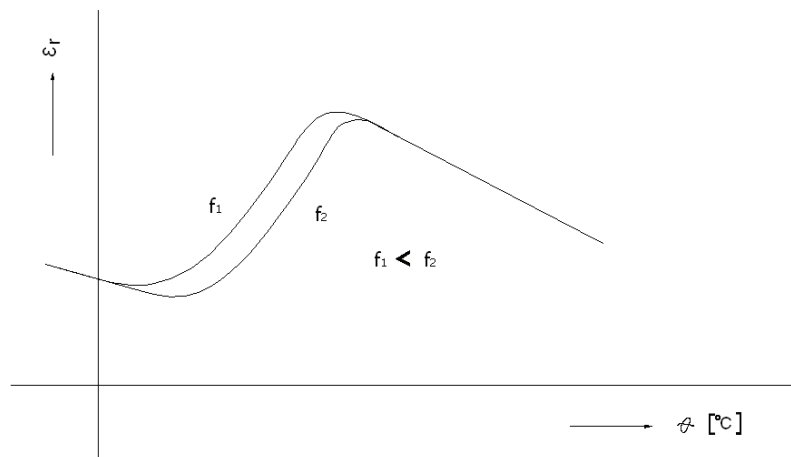
nepolárne tuhé izolanty  $\rightarrow$  rovnaké vlastnosti ako pri nepolárnych kvapalných



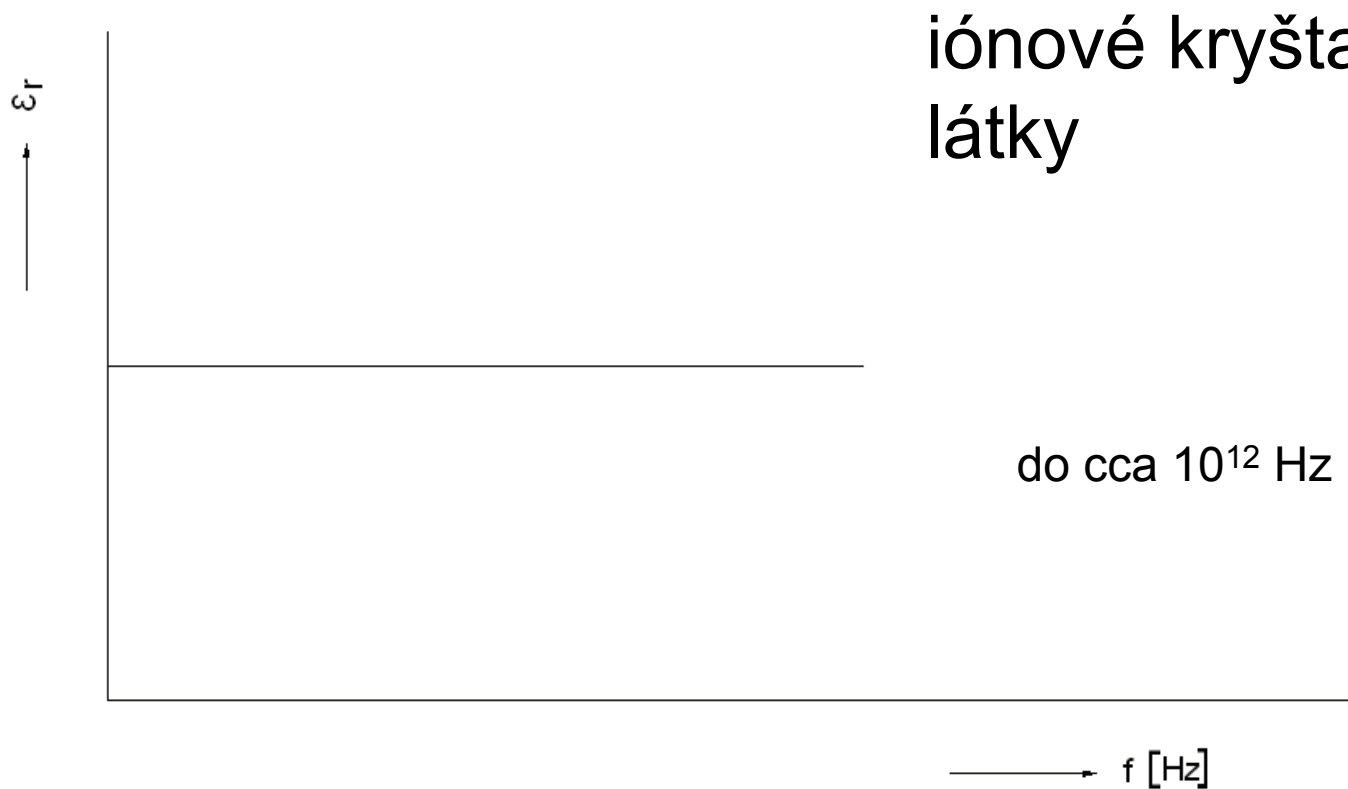


## 2.1 Elektrická polarizácia

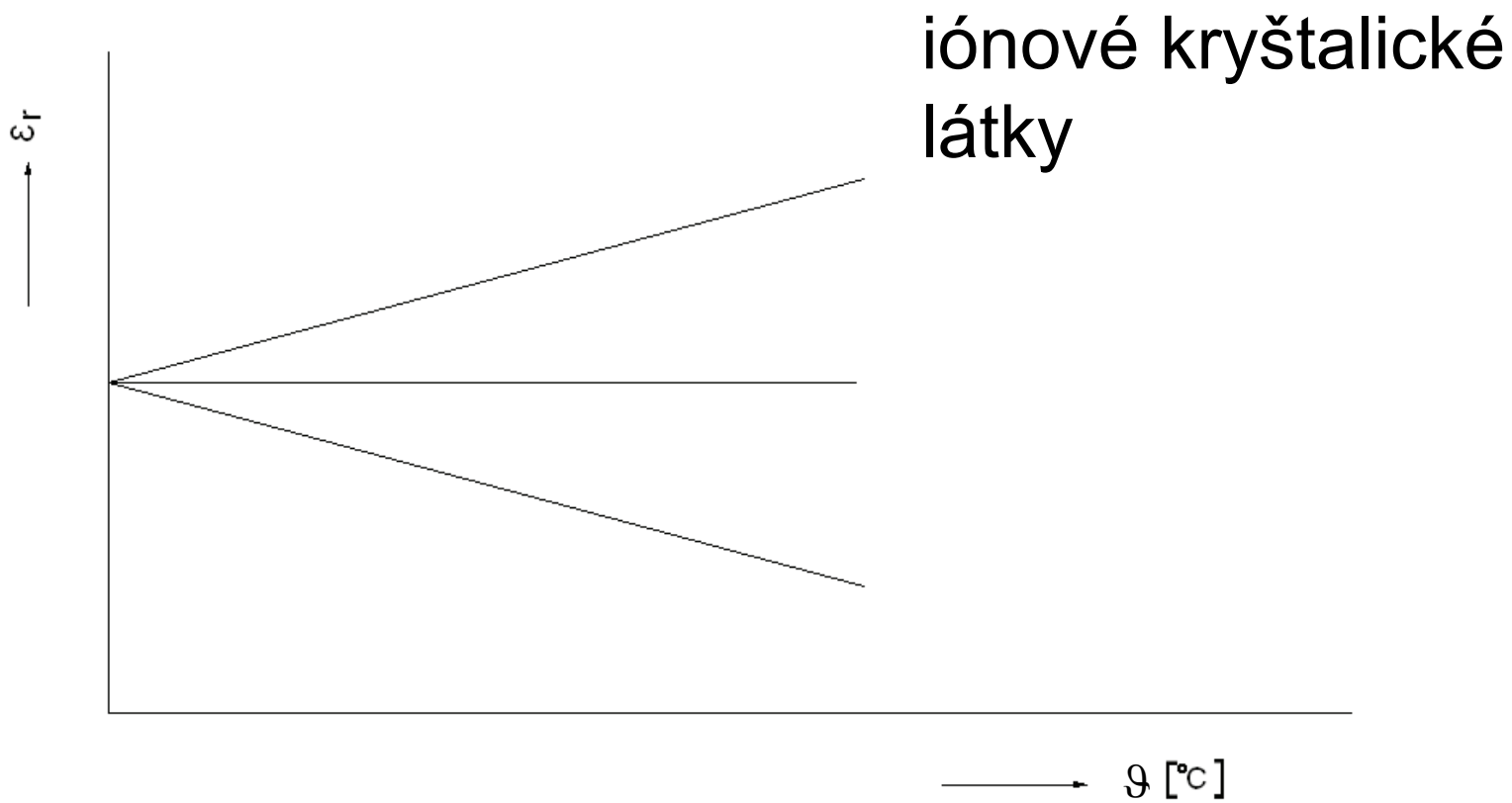
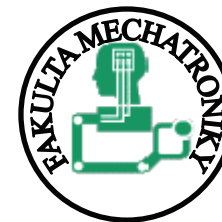
dipólové tuhé izolanty  $\rightarrow$  rovnaké vlastnosti ako pri dipólových kvapalných



## 2.1 Elektrická polarizácia



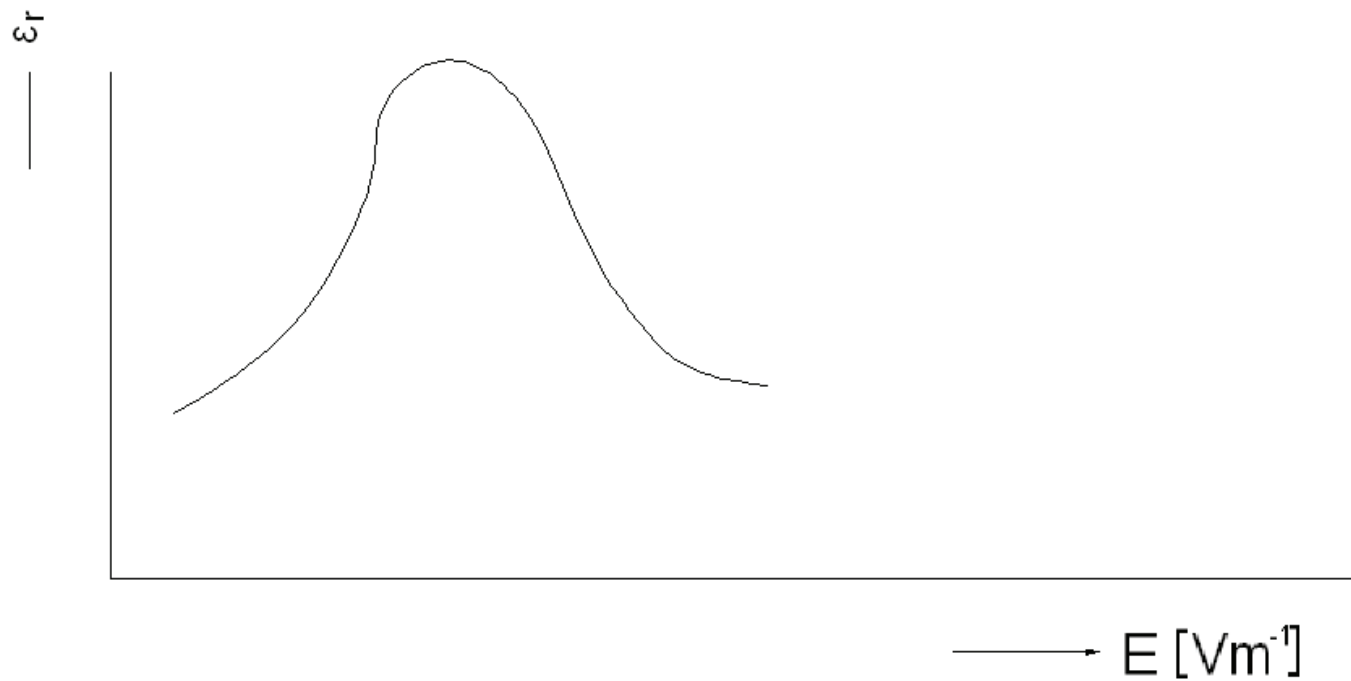
## 2.1 Elektrická polarizácia



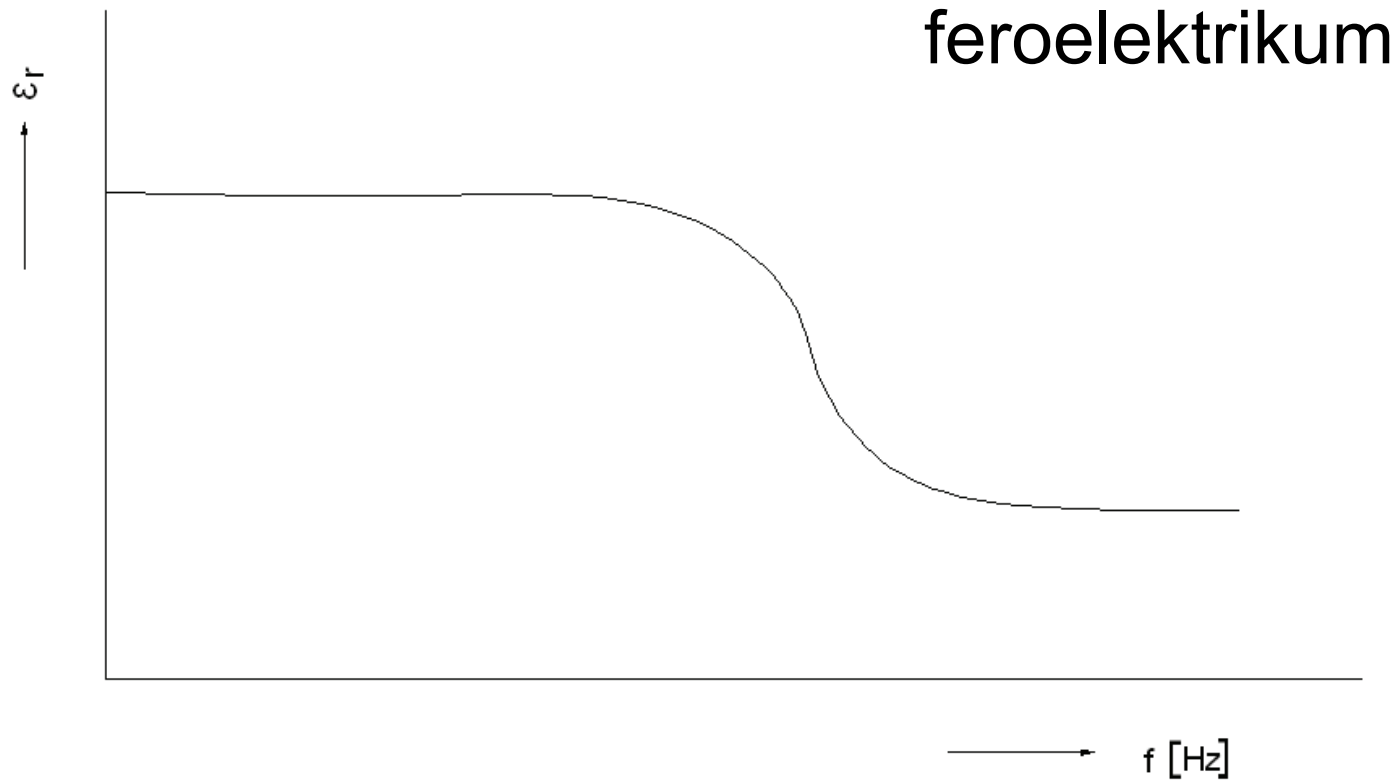
## 2.1 Elektrická polarizácia



feroelektrikum

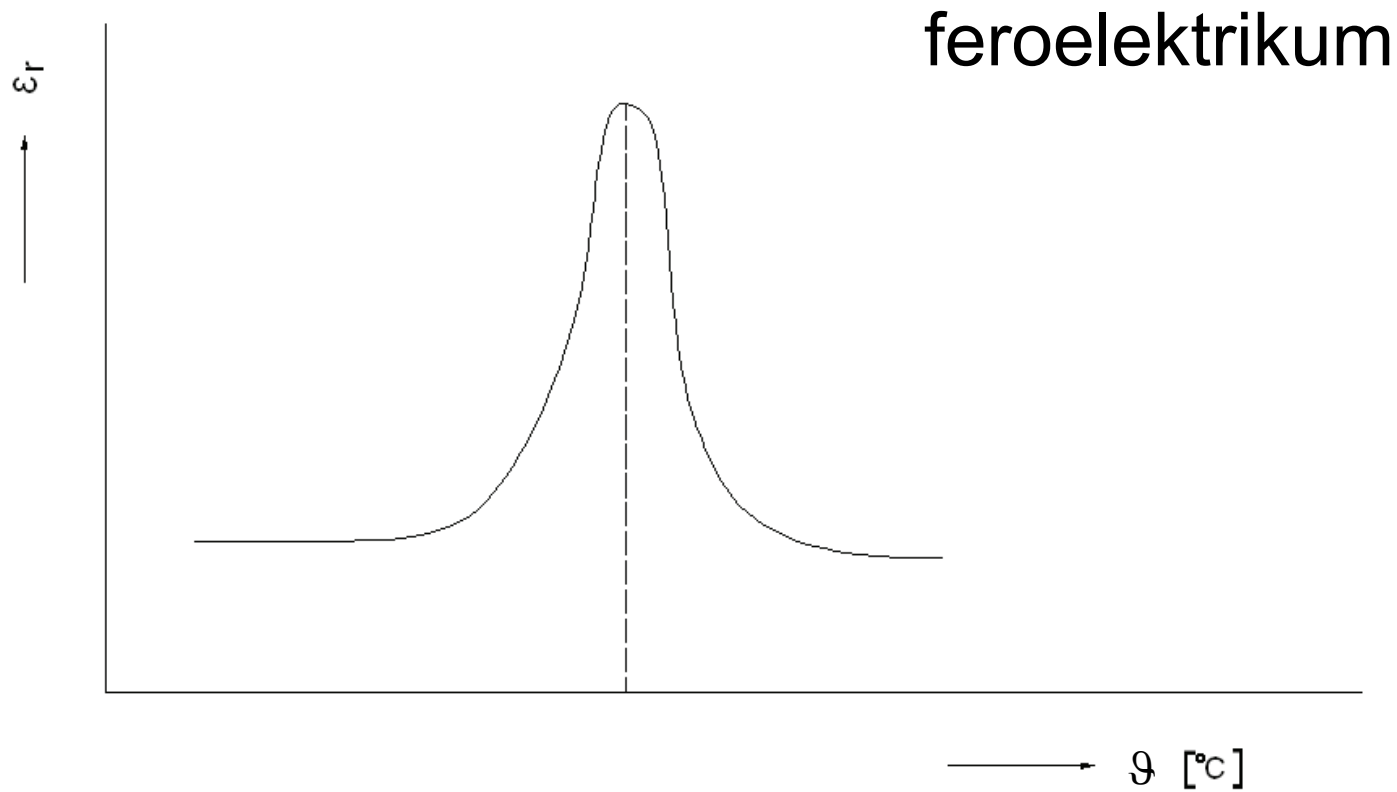


## 2.1 Elektrická polarizácia





## 2.1 Elektrická polarizácia





## 2.2 Elektrická vodivosť

Ideálne: len viazané nosiče náboja (= nulová vodivosť)

Realita: pri  $T > 0 \rightarrow$  volné ióny  $\rightarrow$  izolant vedie elektrický prúd!

Iný mechanizmus vzniku a pohybu pre plynné, kvapalné a tuhé izolanty



## 2.2 Elektrická vodivosť

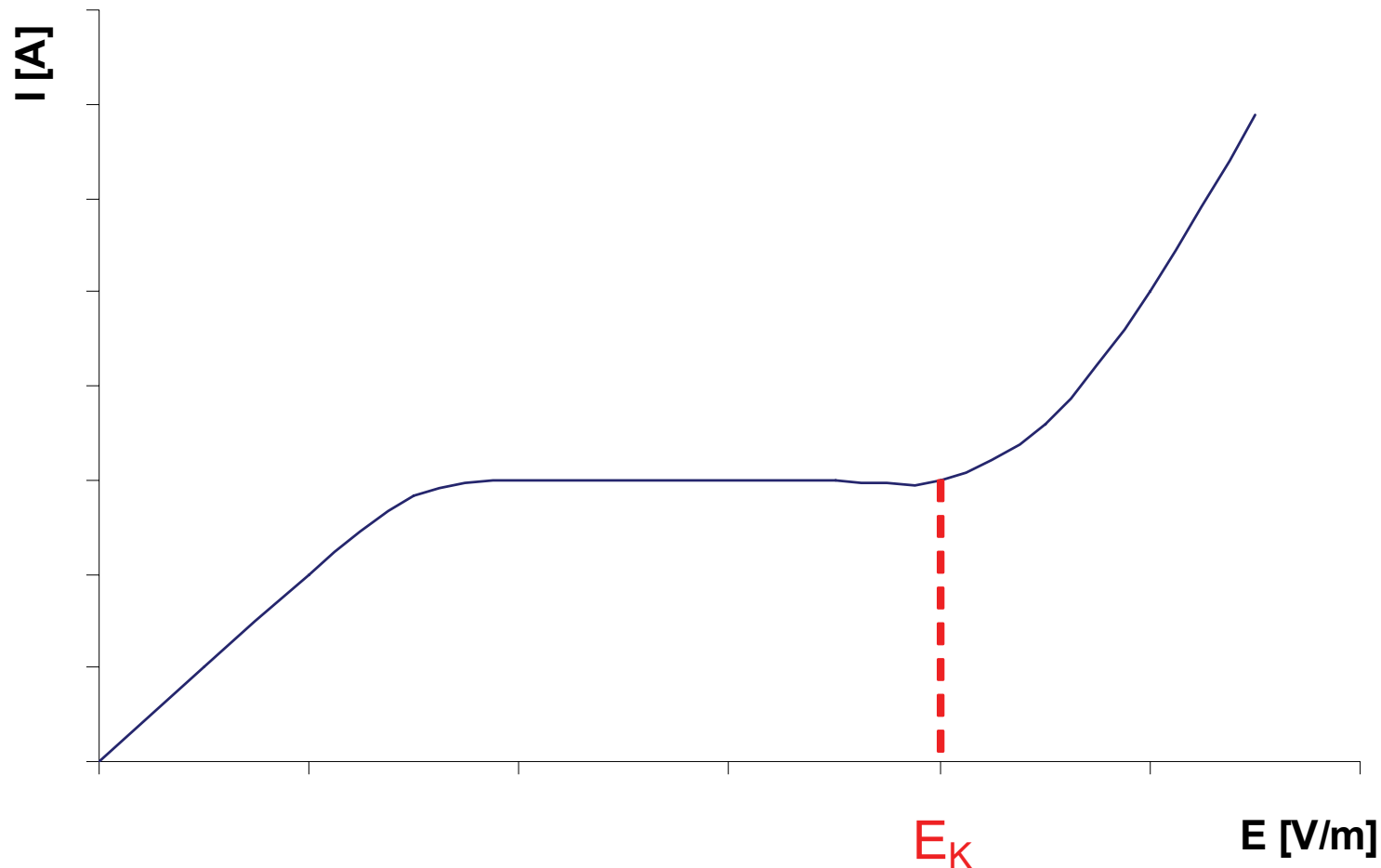
Plyn:

výborný izolant v slabých elektrických poliach  
(nízka koncentrácia voľných nosičov náboja)

najdôležitejší: vzduch

## 2.2 Elektrická vodivost'

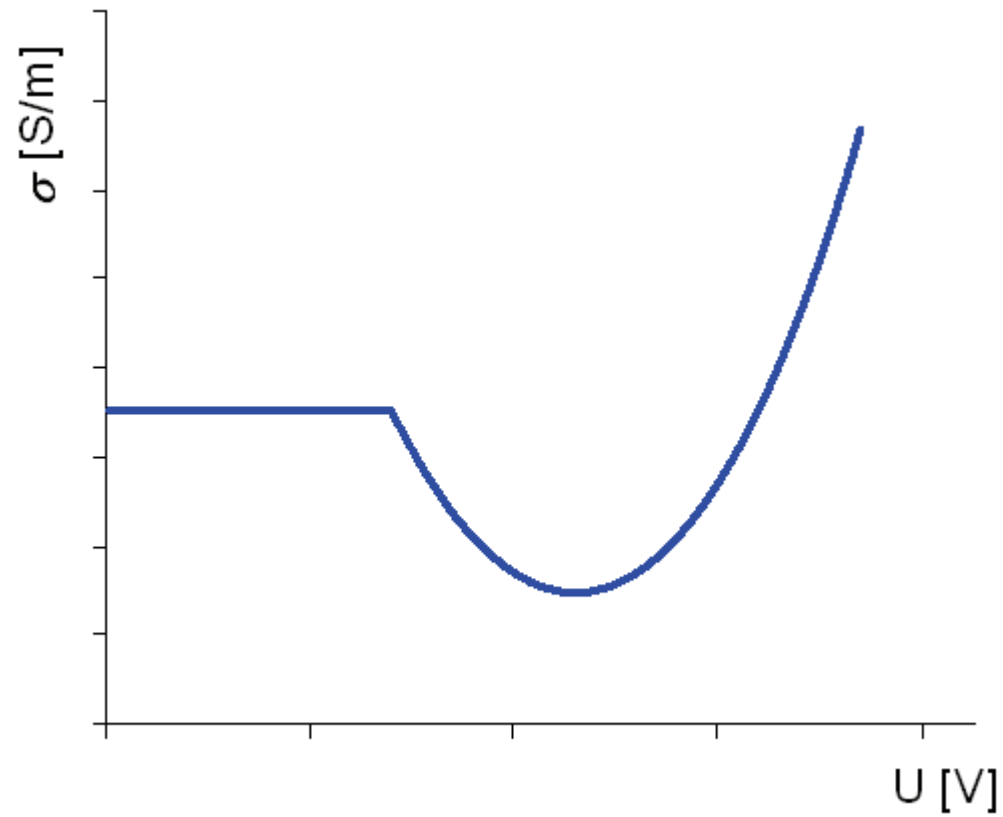
VA charakteristika plynných izolantov:



## 2.2 Elektrická vodivosť



Konduktivita plynných izolantov:





## 2.2 Elektrická vodivosť

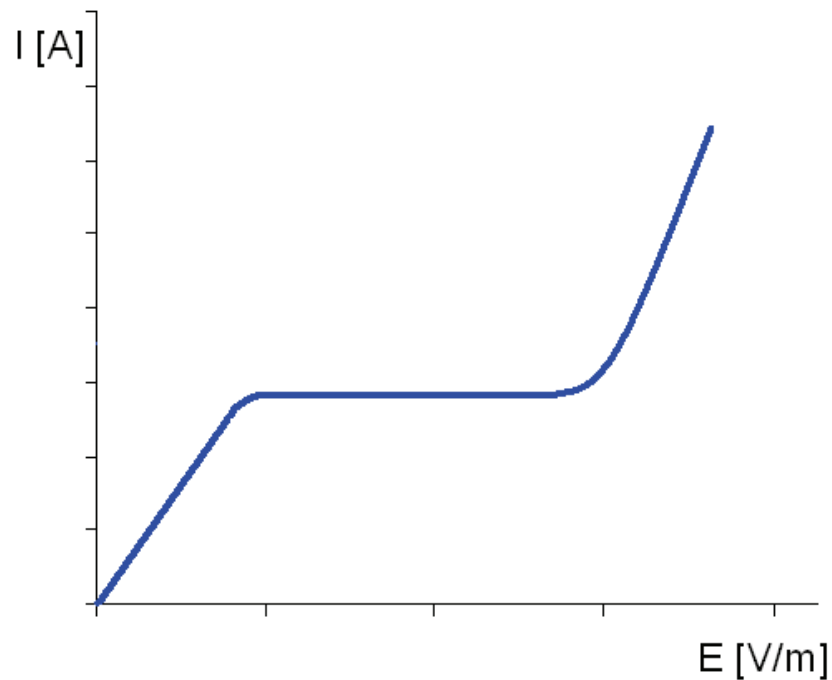


Kvapalnú izoláciu:

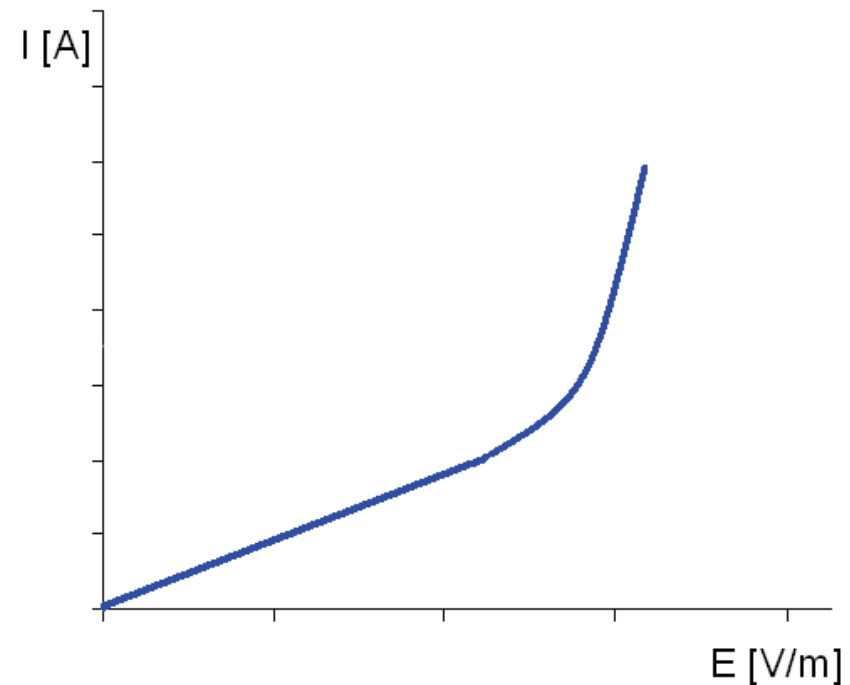
vodivosť závisí od zloženia, obsahu a štruktúry nečistôt a pod.

## 2.2 Elektrická vodivost'

Kvapalně izolanty:



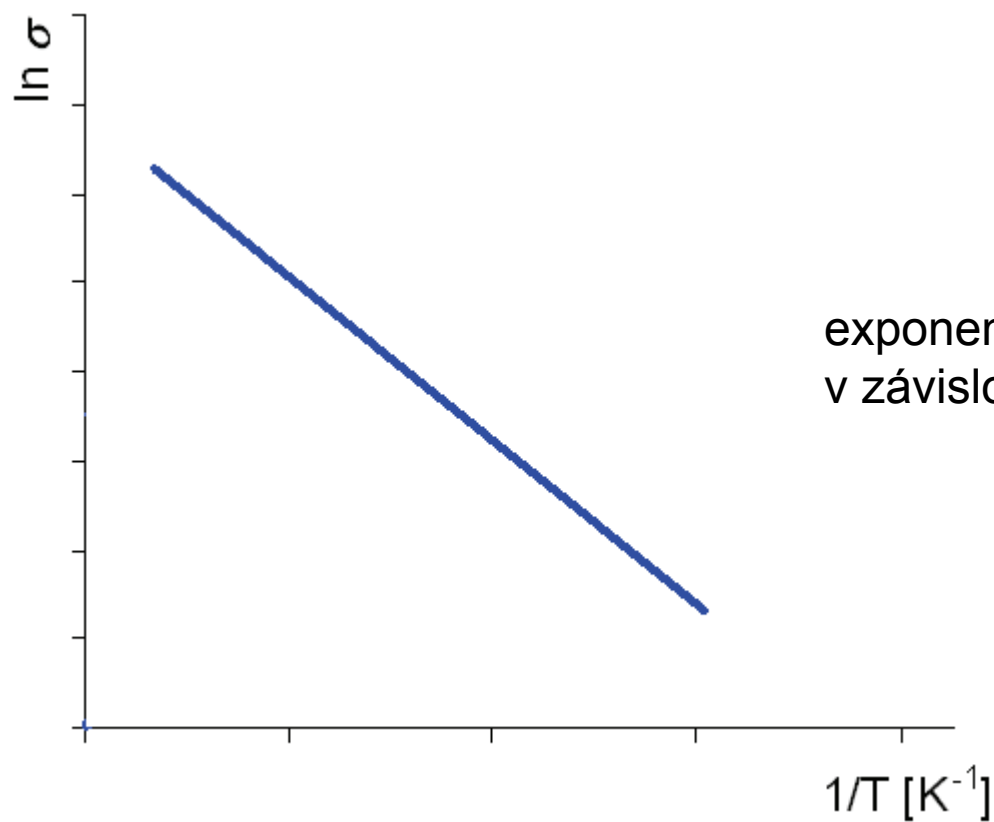
extrémne čisté



technicky čisté

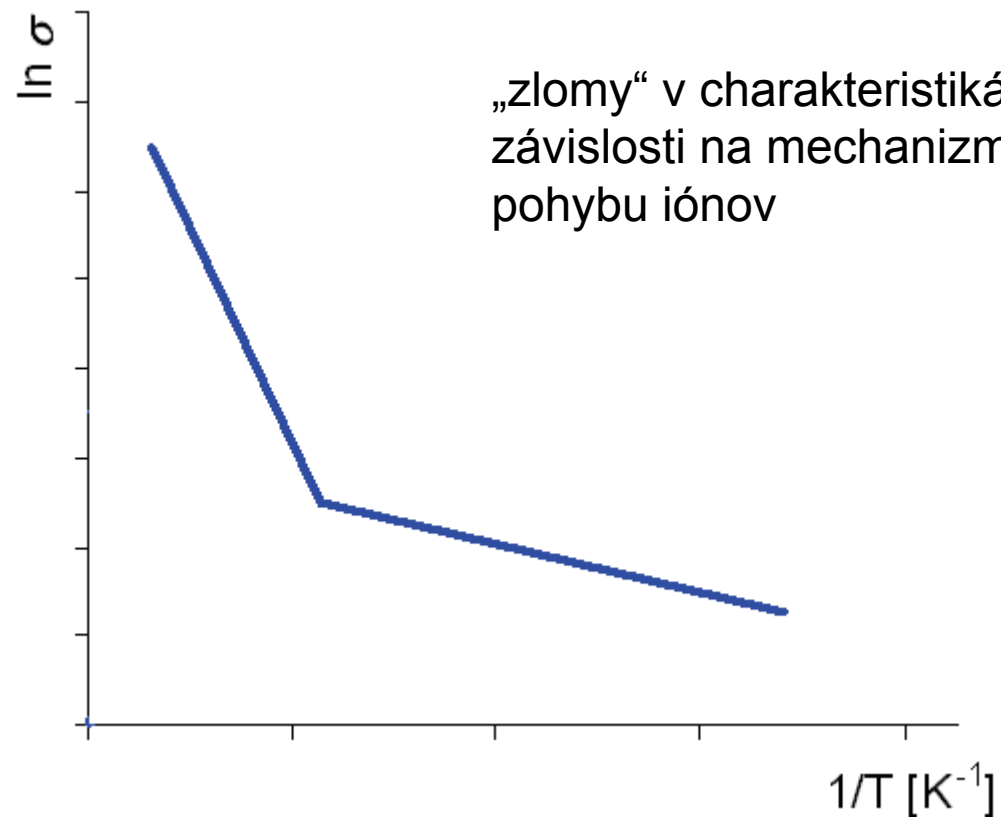
## 2.2 Elektrická vodivosť

Kvapalné izolanty:



## 2.2 Elektrická vodivosť

Tuhé izolanty:





## 2.3 Dielektrické straty

Dielektrické straty → elektrická energia, ktorá sa v danom objeme premení za jednotku času na iný druh energie (spravidla en. tepelnú)

Elektrická vodivosť → straty

Stratový činiteľ → kópia priebehu vodivosti

Parametre: teplota, frekvencia, materiálové vlastnosti, ostatné elektrické vlastnosti...

Parameter: stratový činiteľ:  $\text{tg}\delta$





## 2.4 Elektrická pevnosť

nepatrná el. vodivosť len do určitej hodnoty el. poľa → potom izolant stráca izolačné vlastnosti → konduktivita dosahuje hodnoty typické pre vodivé materiály → najmenšie napätie pri ktorom nastane tento dej: prierazné napätie  $U_p$ , intenzita el. poľa  $E_p$ :

$$E_p = U_p/d$$

## 2.4 Elektrická pevnosť



Prieraz izolantu:

nejasný mechanizmus

vplyv nečistôt + dĺžka pôsobenia napätia



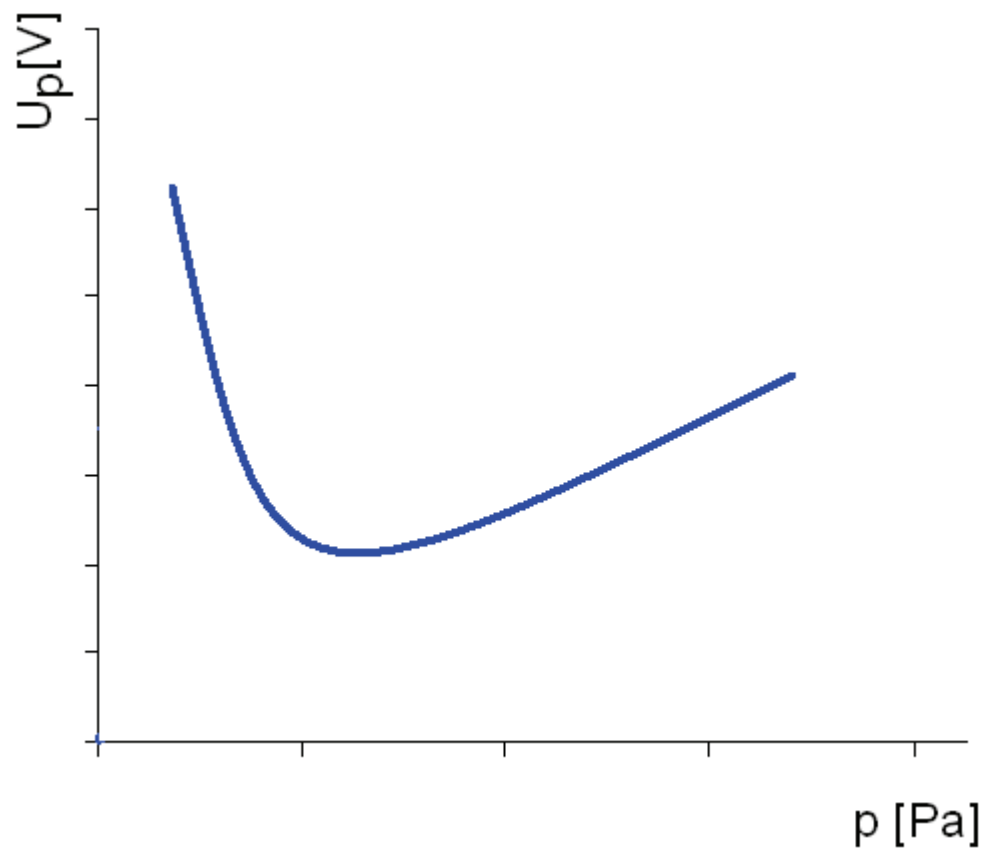
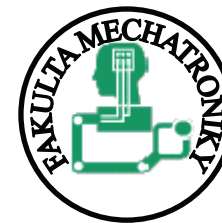
## 2.4 Elektrická pevnosť

dve štádiá prierazu:

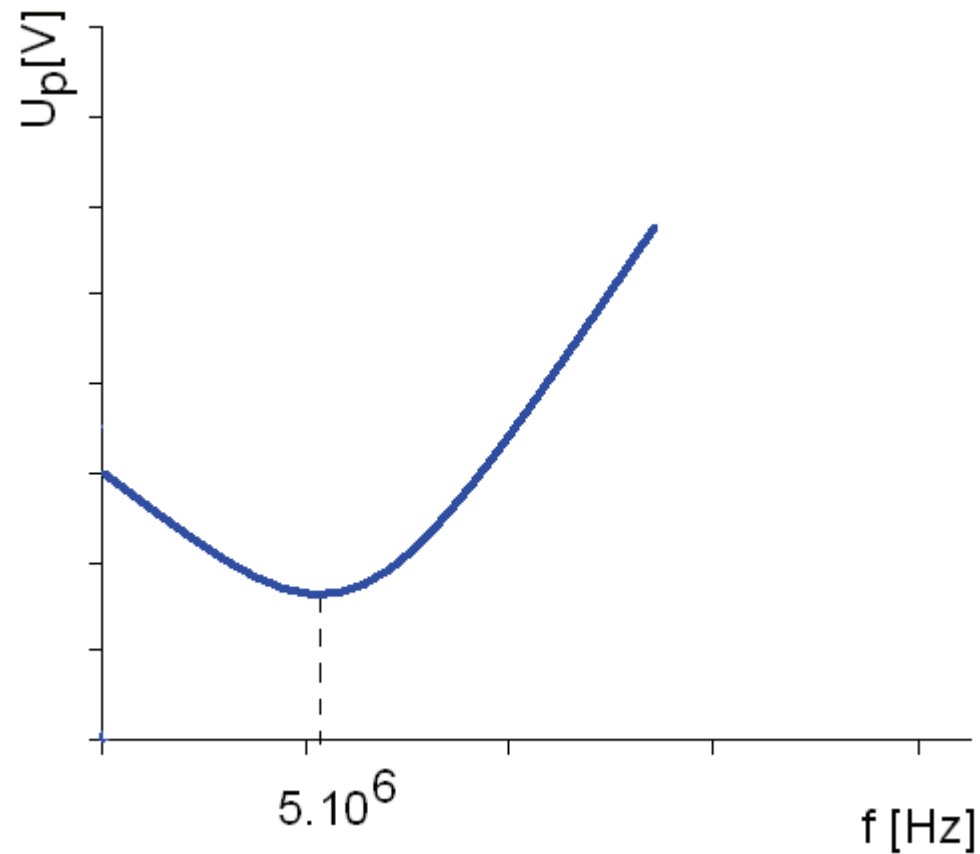
náhly vzrast elektrickej vodivosti

poprierazové (degradačné účinky), plynné a kvapalné sú schopné regenerácie, tuhé spravidla nie

## 2.4 Elektrická pevnost'



## 2.4 Elektrická pevnost'







## 2.5 Izolačné materiály

Plynné:

Vzduch (najčastejší izolant)

Dusík  $N_2$

Vodík  $H_2$

Oxid uhličitý  $CO_2$  (VN kondenzátory)

Vzácne plyny He, Ne, Ar, Kr, Xe  
(žiarovky, žiarivky, tlejivky...)

Fluorid sírový  $SF_6$  (transformátory)



## 2.5 Izolačné materiály

Kvapalné izolanty (často aj ako chladiace médium):

Minerálne oleje (na báze ropy)

Rastlinné oleje (ricínový, ľanový, drevný olej)

Syntetické kvapaliny (polybutény  $C_4H_8$ , kvapaliny na báze difenylu  $C_{12}H_{10}$  alebo esterov, silikónové kvapaliny)



## 2.5 Izolačné materiály

### Organické tuhé izolanty:

- Termoplasty** polyetylén, polypropylén, polystyrén, PVC
- Reaktoplasty** epoxidy, polyestery, aminoplasty
- Elastomery** modifikácie kaučuku
- Vláknité izolanty** celulóza, papiere, lepenky
- Elektroizolačné laky**
- Vosky, asfalty** parafín, naftalén



## 2.5 Izolačné materiály

### Anorganické izolanty:

Azbest

Slúda

Sklené izolanty oxid kremičitý  $\text{SiO}_2$

Keramické izolanty porcelán, steatitová ker.  
korundová ker., titaničitá (polo-  
vodičová technika...)

## 3. Štruktúra pevných látok



3.1 Úvod

3.2 Charakteristiky vlastností

3.3 Väzby v pevných látkach

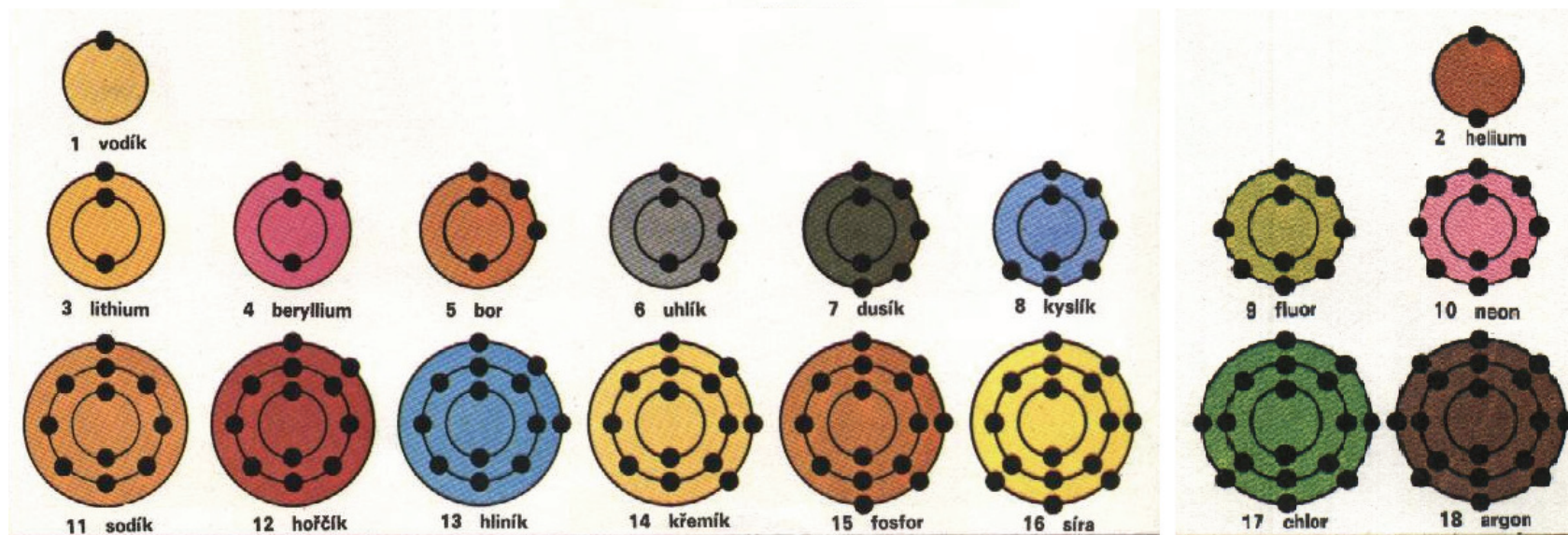
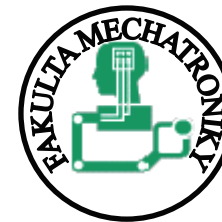
3.4 Štruktúra ideálnych kryštálov

3.5 Poruchy v kryštáloch



# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.1 Úvod





# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.1 Úvod



- 3 skupenstvá:
  - pevné  $10^{22} - 10^{23}$  atómov na  $1 \text{ cm}^3$
  - kvapalné  $10^{22} - 10^{23}$  atómov na  $1 \text{ cm}^3$
  - plynné  $10^{19}$  atómov na  $1 \text{ cm}^3$
  - (plazma)
- (ďalej len látky pevné!)

# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.1 Úvod



- delenie podľa:
  - chémie:
    - organické
    - anorganické
  - fyziky:
    - kryštalické
    - amorfné
  - iné oblasti vedy a výskumu...

# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.1 Úvod

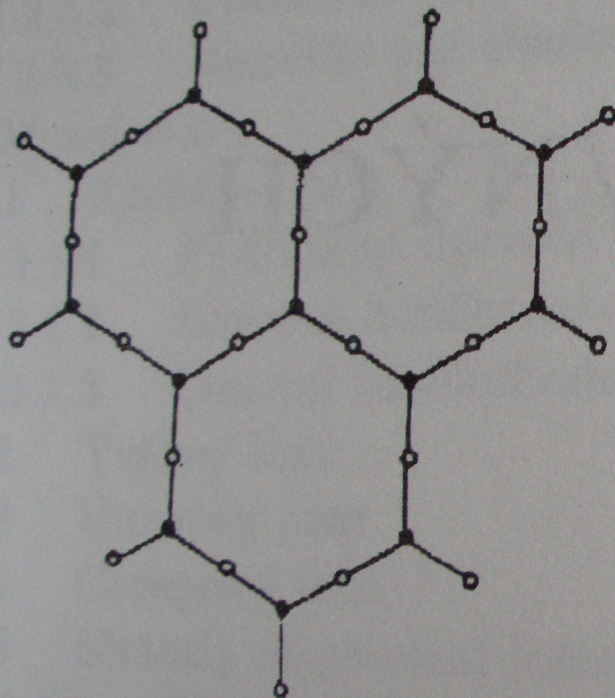
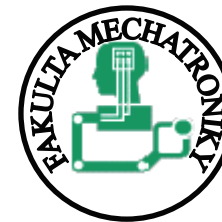


- Kryštalická forma:
  - periodické opakovanie (ideálne  $\infty$  krát, reálne v celom objeme) = **monokryštál** (amorfné látky: veľkosť zrna  $\approx$  veľkosť základného motívu)
  - **polykryštál**: perióda prerušená na hraniciach zrn
- Delenie kryštalickej štruktúry podľa:
  - geometrického usporiadanie častíc
  - stupňa usporiadania
  - druhu častíc

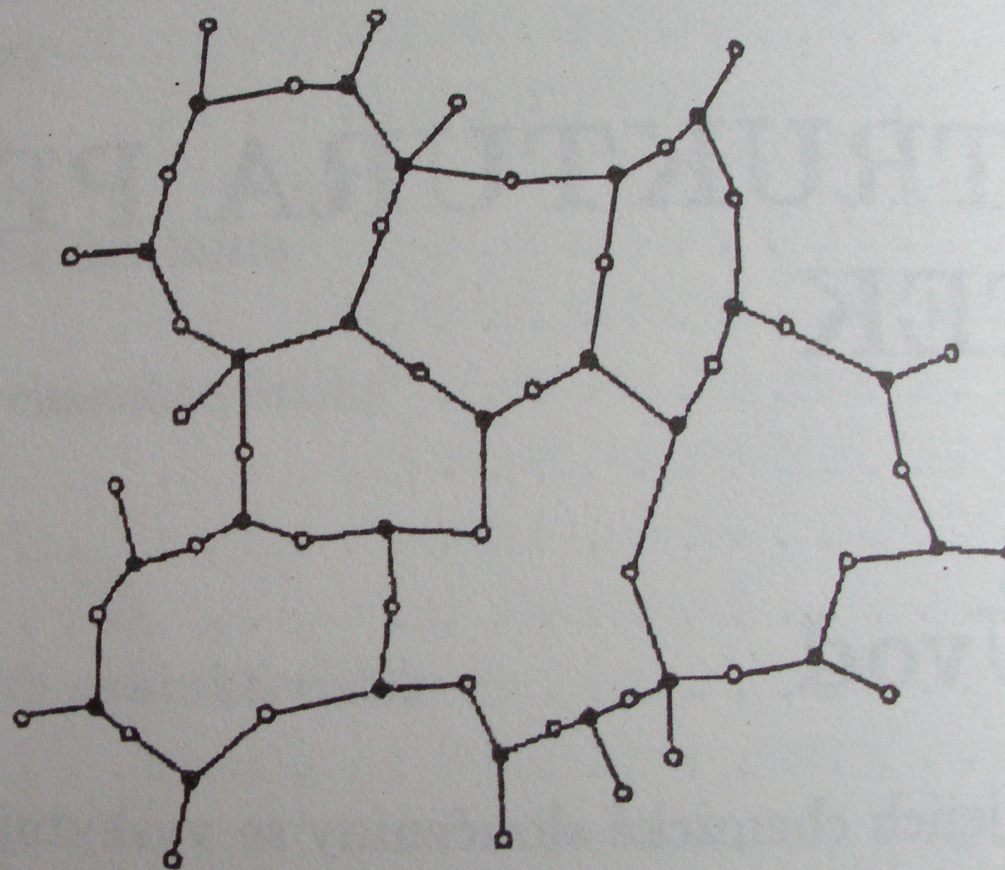


# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.1 Úvod



(a)



(b)

# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.1 Úvod



- Fyzikálne vlastnosti:
  - magnetické, transportné, tepelné, radiačné, optické, emisné, **mechanické** ...
- Fyzikálno-chemické:
  - chemické, elektrochemické...
- Technologické:
  - tvarovateľnosť, kvalita, možnosti zvarovania...



# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.1 Úvod



- Pevná látka →
  - pevná poloha atómov → výnimky:
  - kmitavý (neusporiadaný) pohyb okolo rovnovážnych polôh (tepelný pohyb)
  - rotačný pohyb (v niektorých prípadoch)

# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.2 Charakteristiky vlastností



- **Štruktúrne charakteristiky** (štruktúra = systém elementov z ktorých je zložený daný objekt):

Monokryštál

Polykryštál (fázy s odlišnou kryštalografickou štruktúrou)

Mriežkové poruchy → subštruktúra

# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.2 Charakteristiky vlastností



- **Štruktúrne charakteristiky** (štruktúra = systém elementov z ktorých je zložený daný objekt):

Súvislosti medzi mechanickými vlastnosťami a štruktúrnymi charakteristikami → potreba charakterizovať štruktúru pomocou fyzikálnych veličín

Faktory: **vonkajšie** (teplota, sily, čas, agresivita okolia...)

**vnútorné** (chem. zloženie, mikročistota, chyby...)

# 3. Štruktúra pevných látok

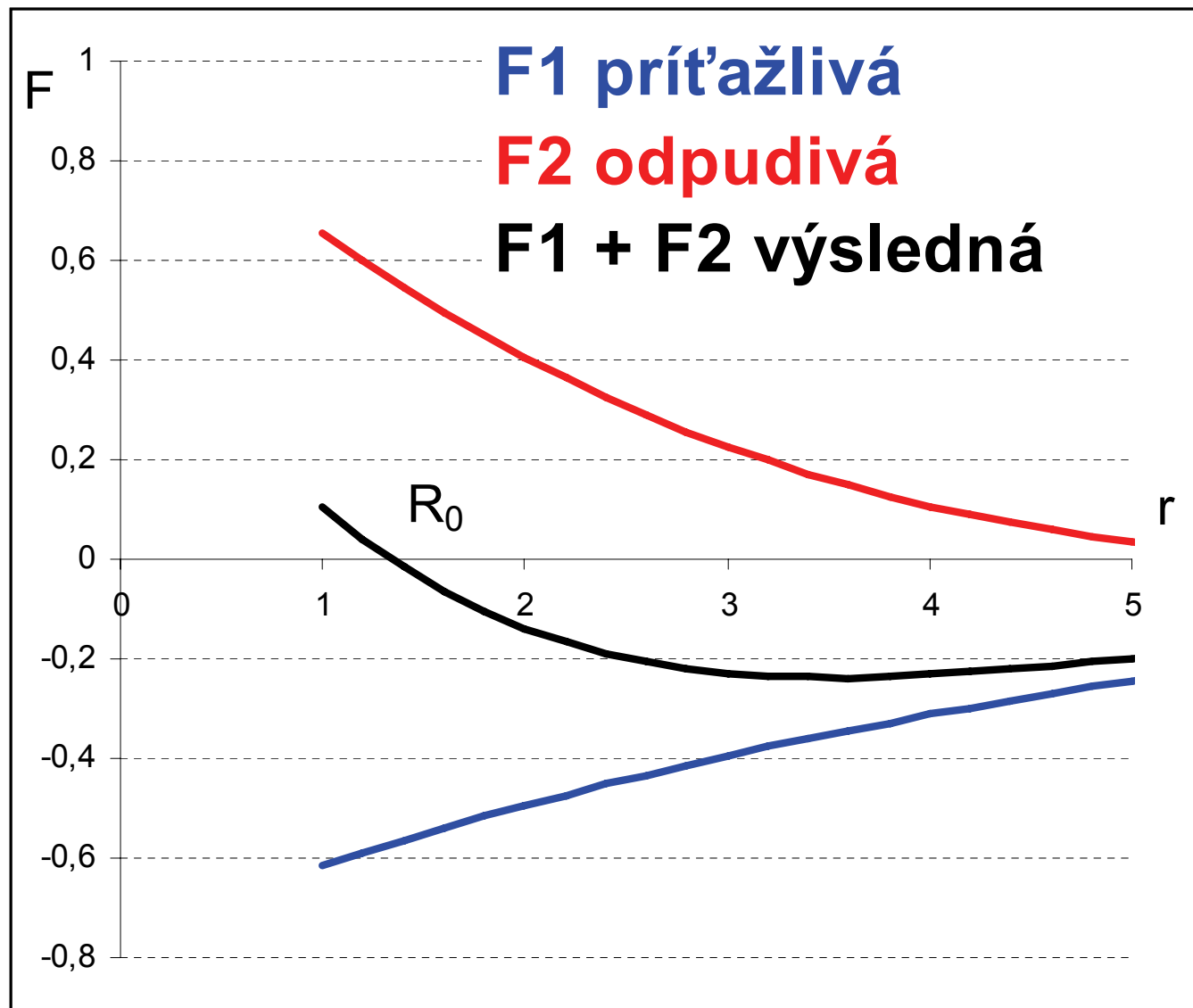
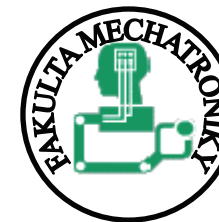
## 3.3 Väzby v pevných látkach



- Pevné látky sú držané pohromade ***kohéznymi*** silami (elektrostatická interakcia medzi elektrónmi a jadrom)
- Kohézne sily:
  - prít'azlivé
  - odpudivé
  - (ich rovnováha = stabilita systému)
- Kohézna energia (veličina charakterizujúca stabilitu) „ $U$ “  
$$U = E_v - E \quad [\text{eV/atóm}]$$

# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.3 Väzby v pevných látkach





# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.3 Väzby v pevných látkach



- Odpudivé sily
  - pri malých vzdialenostiach jadier atómov:
    - odpudivá reakcia (jadro – jadro → obe s kladným nábojom)
  - ak prenikne elektrónový obal do vnútra iného elektrónového obalu, potom:
    - Pauliho princíp (excitácia vonkajších elektrónov) → zvýšenie energie sústavy → odpudivá reakcia
    - nedôjde k excitácii → vznik príťažlivej sily a vznik kryštalickej väzby

# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.3 Väzby v pevných látkach



- Príťažlivé sily
  - iónová väzba,
  - kovalentná väzba,
  - kovová väzba,
  - Van der Waalsova väzba,
  - vodíkova väzba.

# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.3 Väzby v pevných látkach



- Iónová väzba - dôsledok elektrostatických síl medzi aniónmi a kationmi, ale aj rozdielnej „elektronegativnosti“ prvkov.
  - Inertné plyny F, Cl, Br, I - tendencia zachytiť e
  - alkalické kovy Na, K, Rb, Cs - trend stratiť e
- **Vlastnosti:** aj malá zmena vzdialenosti môže viesť k veľkému zvýšeniu vnútornej energie → obmedzenie pohybových možností dislokácií → vplyv na väčšinu mechanických charakteristík

# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.3 Väzby v pevných látkach



- Kovalentná väzba - dvojica elektrónov, ktorá patrí viacerým atómom.
- **Vlastnosti:** dôsledok kvantovo-mechanického efektu tzv. výmenných síl. Pri dostatočnom priblížení → zmena elektrónového oblaku → e prechádzajú z atómových sfér na molekulové. Atómy si zdieľajú elektróny → zníženie energie kryštálu → vznik výmenných príťažlivých síl. Je veľmi silná. Aj malé odchýlky od ideálneho usporiadania vedú k veľkému nárastu vnútornej energie → prerušenie väzieb.

# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.3 Väzby v pevných látkach



- Kovová väzba - atómy uvoľnia časť valenčných elektrónov do spoločného vlastníctva kladných iónov.
- **Vlastnosti:** kovy: vysoká pohyblivosť valenčných (vodivostných) elektrónov. Tieto výrazne prispievajú k väzobnej energii. Char. črta: zníženie celkovej energie vzhľadom k voľným atómom.

Kovová väzba je všesmerová, e sa ľahko preskupujú → lokálna porucha → žiadna zásadná zmena v konfigurácii energetických hladín.

Pri premiestnení porúch v mriežke nedochádza k prerušeniu väzby → dobrá plasticita väčšiny kovov



# 3. Štruktúra pevných látok

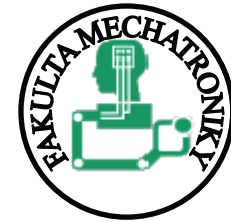
## 3.3 Väzby v pevných látkach



- Van der Waalsova väzba - vzájomné silové pôsobenie dipólov molekúl
- **Vlastnosti:** nie je podstatná pre technické materiály, relatívne slabá väzba
- Vyskytuje sa: plyny, kvapaliny, plasty
- Závislosť na  $r^6$

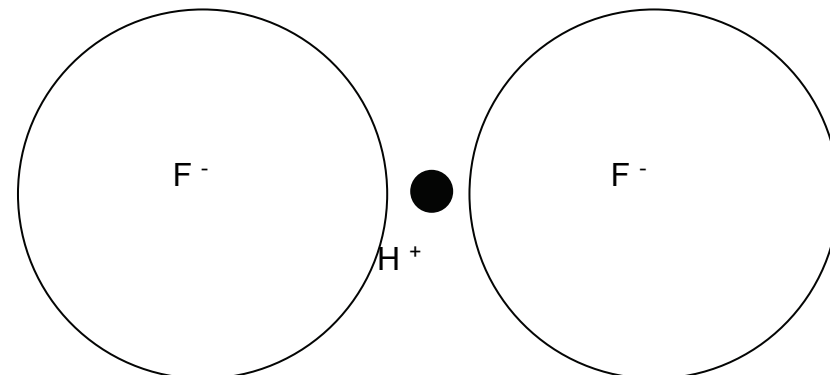
# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.3 Väzby v pevných látkach



- Vodíková väzba - špecifické pôsobenie medzi  $H$  a (napr.)  $O$
- **Vlastnosti:** Atóm vodíku je za určitých okolností priťahovaný k 2 atómom a vytvára medzi nimi tzv. vodíkovú väzbu. Táto je základom interakcie medzi molekulami  $H_2O$ , určuje vlastnosti vody a ľadu (spolu s Van der Waalsovou väzbou).

Vodík predá elektrón ďalším atómom molekuly → protón vytvára vodíkovú väzbu. Dva susediace atómy sú veľmi blízko → nepripustia k vodíku tretí atóm



# 3. Štruktúra pevných látok

## 3.4 Štruktúra ideálnych kryštálov



- Periodické zoskupenia atómov

Kryštál = 3D periodické zoskupenie atómov

Ideálny kryštál (monokryštál) =  $\infty$  opakovanie štruktúry jednotiek v priestore

môže to byť:

1 atóm (Cu, Ag, Fe)

2 – 1.000 atómov (anorganické kryštály)

10.000 atómov (bielkoviny)



## 3.4 Štruktúra ideálnych kryštálov

- Periodické zoskupenia atómov

usporiadanie atómov vyzerá rovnako, ak je pozorované z ľubovoľného bodu  $\mathbf{r}$  alebo  $\mathbf{r}'$ :

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} + u\mathbf{a} + v\mathbf{b} + w\mathbf{c}$$

kde  $u, v, w$  sú ľubovoľné celé čísla

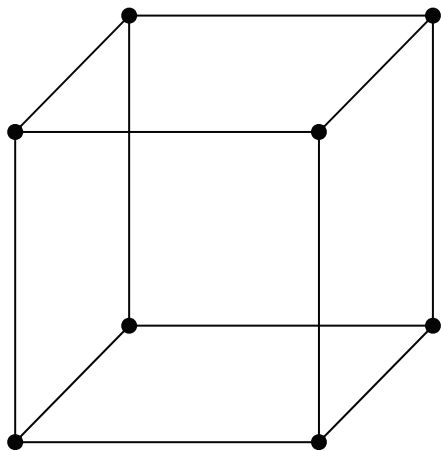
$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$  (primitívne) translačné vektory

množina bodov  $\mathbf{r}'$  pre všetky  $u, v, w$  tvorí mriežku

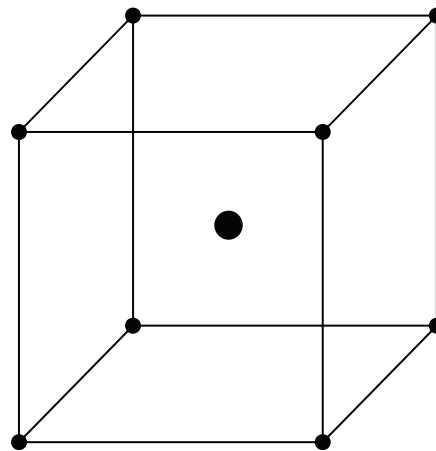
## 3.4 Štruktúra ideálnych kryštálov



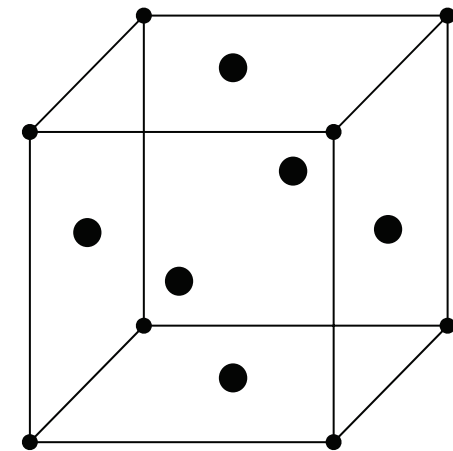
- Základné kryštálové štruktúry\*



Kubická prostá  
(sc)



Kubická priestoro  
centrovaná (bcc)



Kubická plošne  
centrovaná (fcc)

\*celkom rádovo desiatky štruktúr



## 3.4 Štruktúra ideálnych kryštálov



- Indexy bodov, priamok a rovín
  - všetky elementárne bunky sú rovnaké → stanovením polôh atómov v jednej sú stanovené polohy všade
  - poloha atómu: 3 čísla:  $m$ ,  $n$ ,  $p$ :  
atóm  $[[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}]]$  leží v strede elem. bunky

## 3.4 Štruktúra ideálnych kryštálov



- Indexy bodov, priamok a rovín
  - Smer: daný počiatkom a bodom:  
 $ua, vb, wc$  ako  $[u \ v \ w]$

## 3.4 Štruktúra ideálnych kryštálov

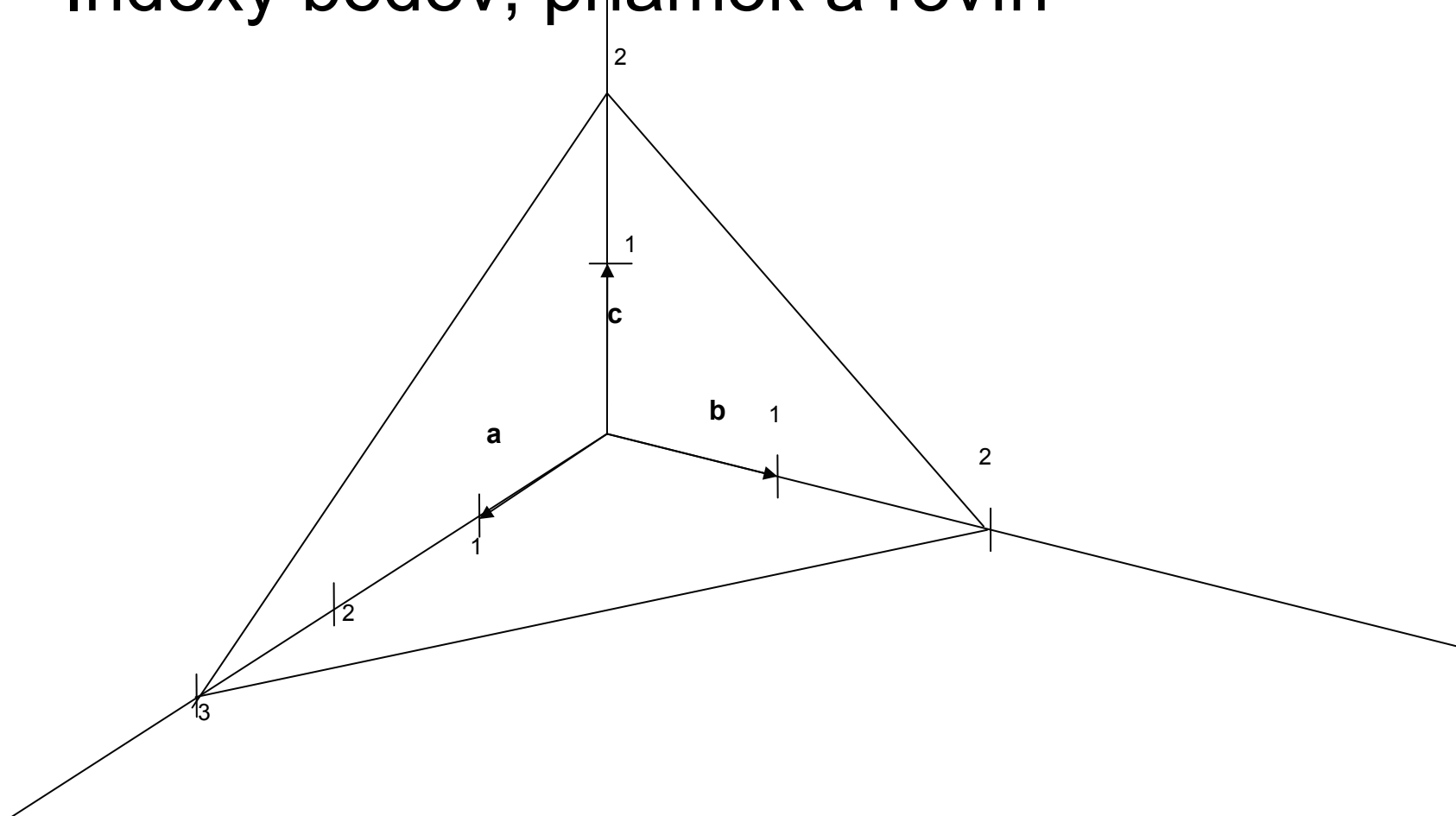


- Indexy bodov, priamok a rovín
  - Mriežkové roviny: rovina v úsekoch  $\mathbf{a}/h$ ,  $\mathbf{b}/k$ ,  $\mathbf{c}/l$  kde  $h$ ,  $k$ ,  $l$  sú celé nedeliteľné čísla (tzv. Millerove indexy)
  - Hexagonálna sústava: Miller-Bravaisove indexy

## 3.4 Štruktúra ideálnych kryštálov



- Indexy bodov, priamok a rovín



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

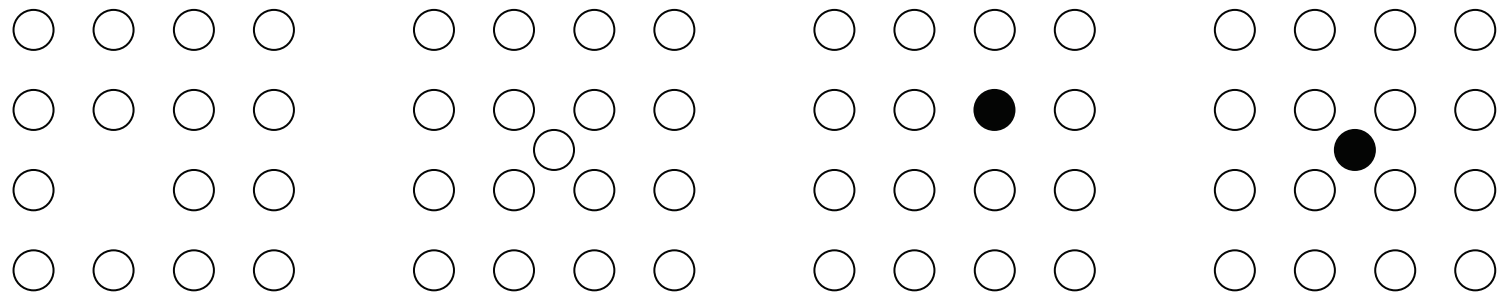


- rozmery poruchy väčšie ako atomárne:
  - bodové
  - čiarové
  - plošné
  - objemové



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Bodové poruchy:

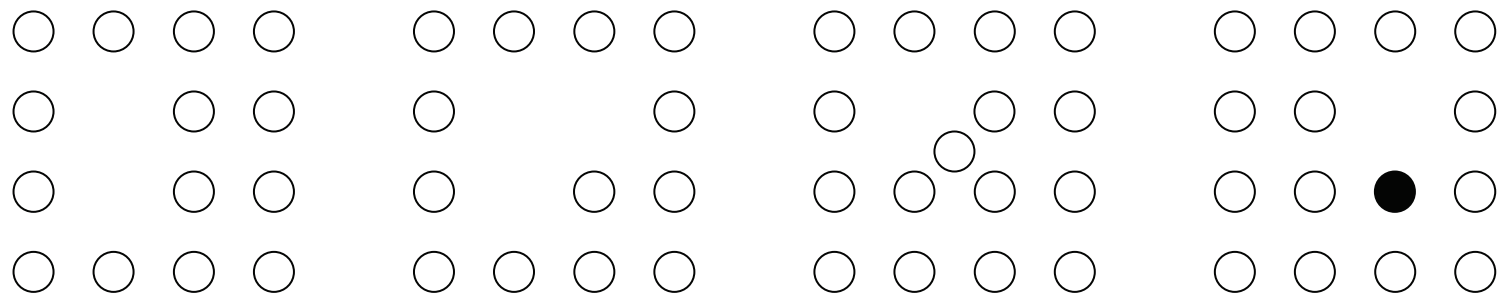


**VAKANCIA**

**INTERSTICIÁLNY  
ATÓM**

**SUBST.  
PRÍMESY**

**INTERST.  
PRÍMESY**



**DIVAKANCIA**

**TRIVAKANCIA**

**FRENKELOV  
PÁR**

**VAKANCIA  
+PRÍMES**



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Bodové poruchy:

v skutočnosti: napät'ové pole  $\rightarrow$  posun  
stredných polôh častíc

koncentrácia bodových porúch  $\rightarrow$  vzťahy o  
energii systému (Boltzmanova  
konštanta,...)  $\rightarrow$  Stabilný systém aj vtedy,  
ak časť mriežkových bodov je neosadená



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Dislokácie = čiarové poruchy:

Dislokácia = porušenie pravidelnosti štruktúry kryštálu pozdĺž určitej čiary, jej dĺžka môže byť zrovnateľná s rozmerom kryštálu

Najvýznamnejšie poruchy mriežky

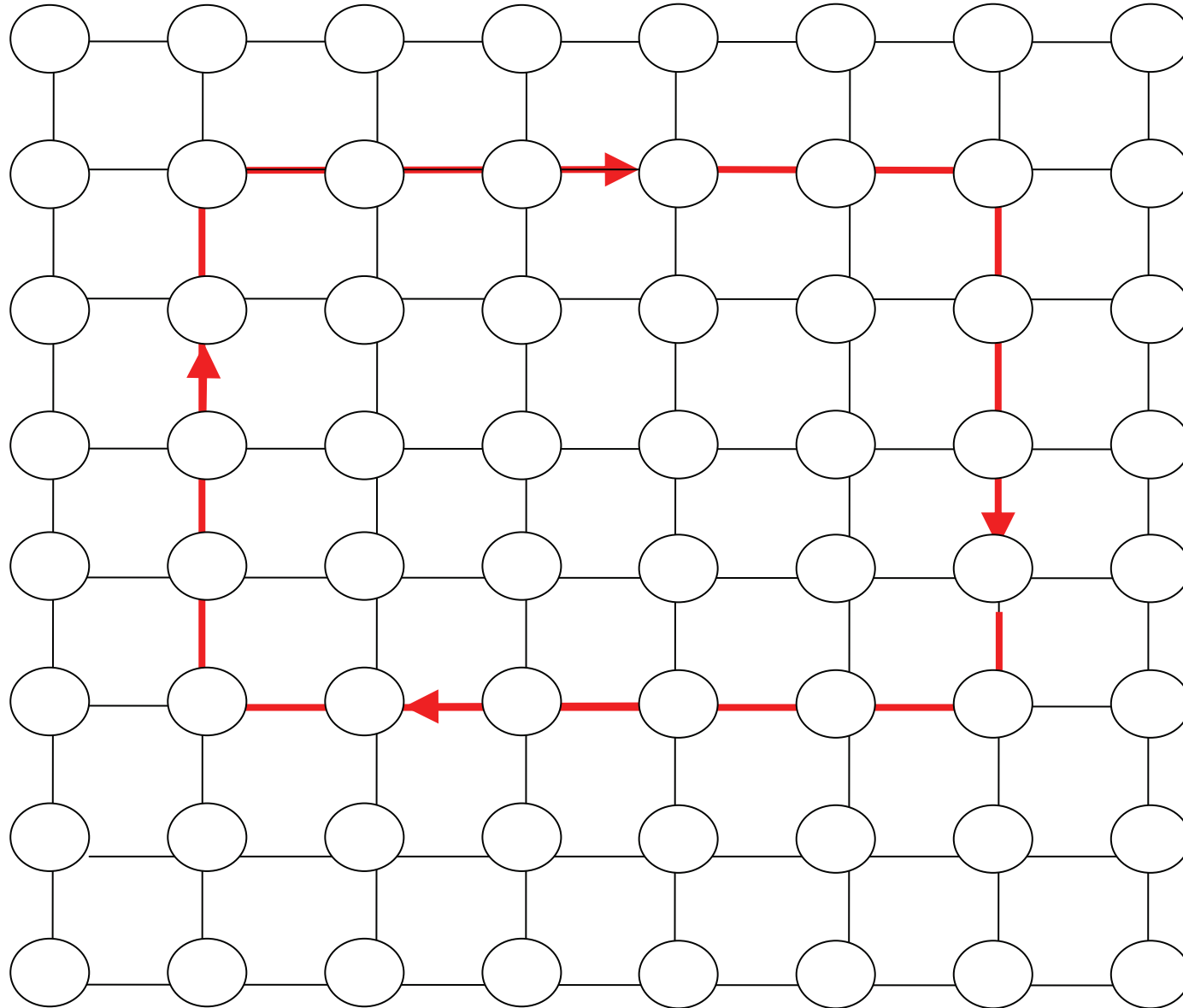
V tuhej látke termodynamicky nestabilné



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Druhy (typy) dislokácií:
  - Hranové
  - Skrutkové
- Označenie:  $T \perp$

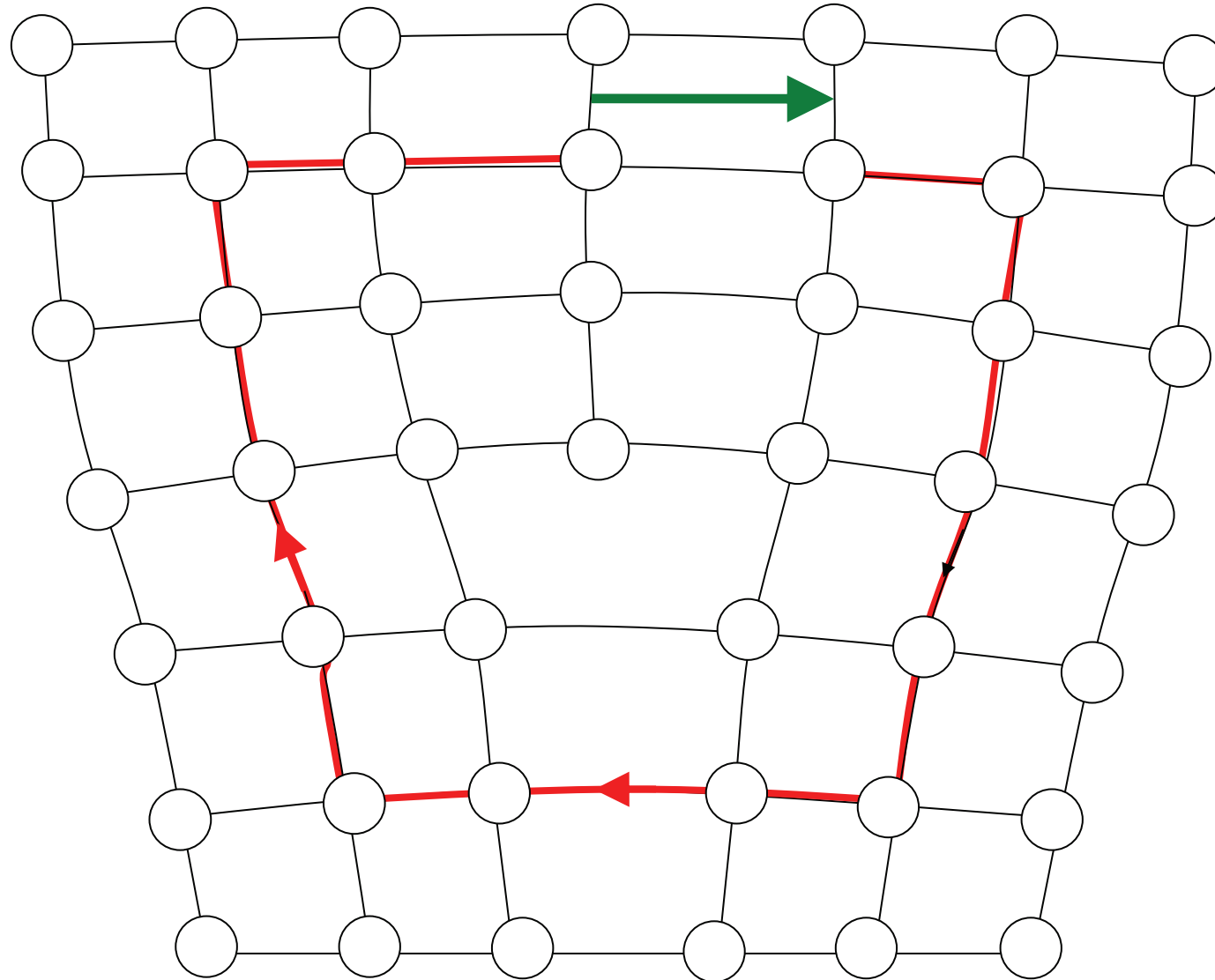
## 3.5 Poruchy v kryštáloch



# 3.5 Poruchy v kryštáloch



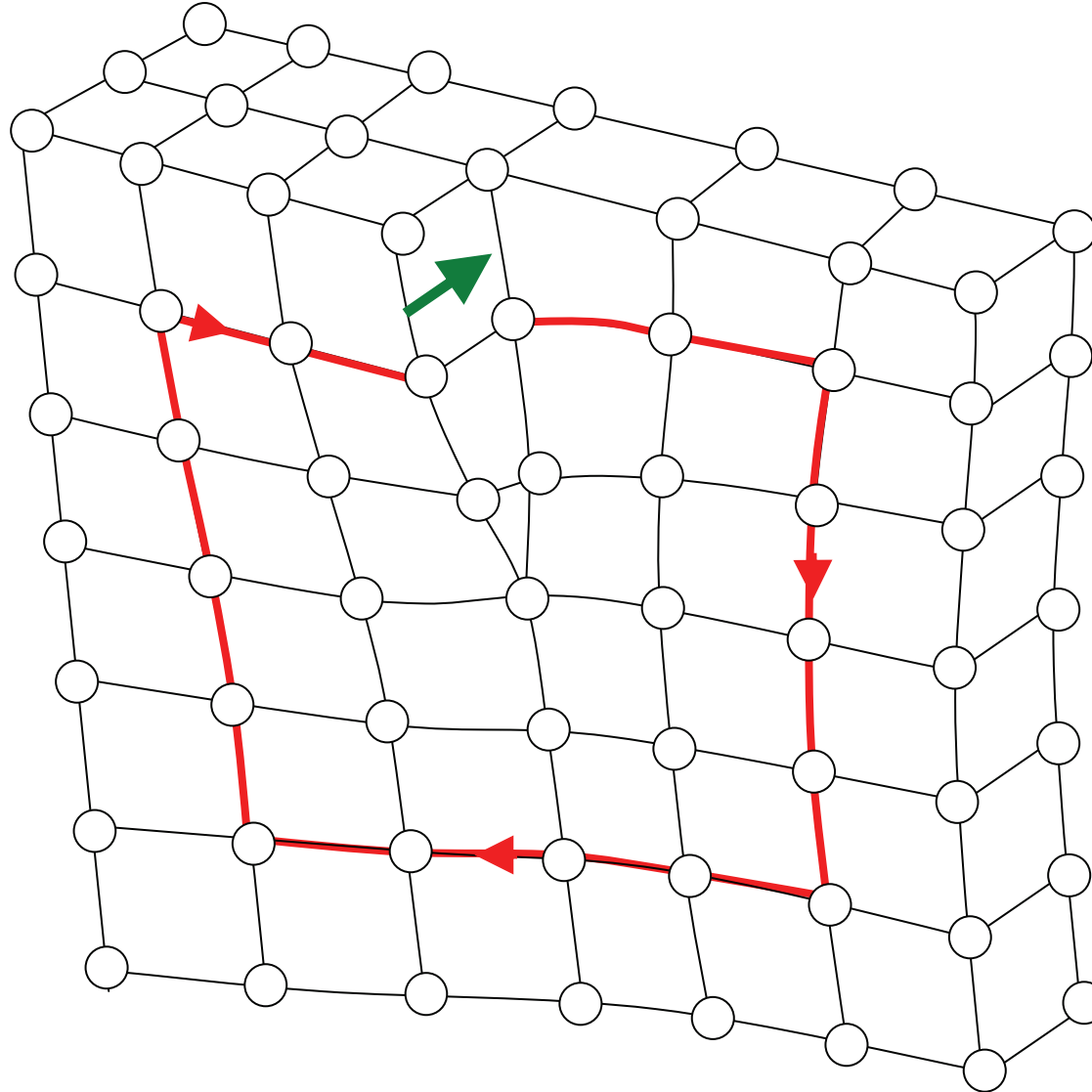
## Hranová dislokácia





# 3.5 Poruchy v kryštáloch

## Skrutková dislokácia





## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Dislokácie:
  - Existuje polomer  $R_j \approx 1 \text{ nm}$ , t. j. 2 - 3 medziatómové vzdialenosti, kde sú deje neštandardné. Vnútoraná oblasť okolo dislokácií o polomere  $R_j$  = jadro dislokácie
  - Vznik a vzrast dislokácií závisí od spôsobu výroby, spracovania materiálu ...



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Dislokácie:
  - Hustota dislokácií:  $\rho_D = \Delta l / \Delta V$  [m<sup>-2</sup>]  
celková dĺžka dislokačných čiar v jednotke objemu
  - Dislokácie vo svojom okolí vyvolávajú mechanické napätie a významne zvyšuje vnútornú energiu materiálu

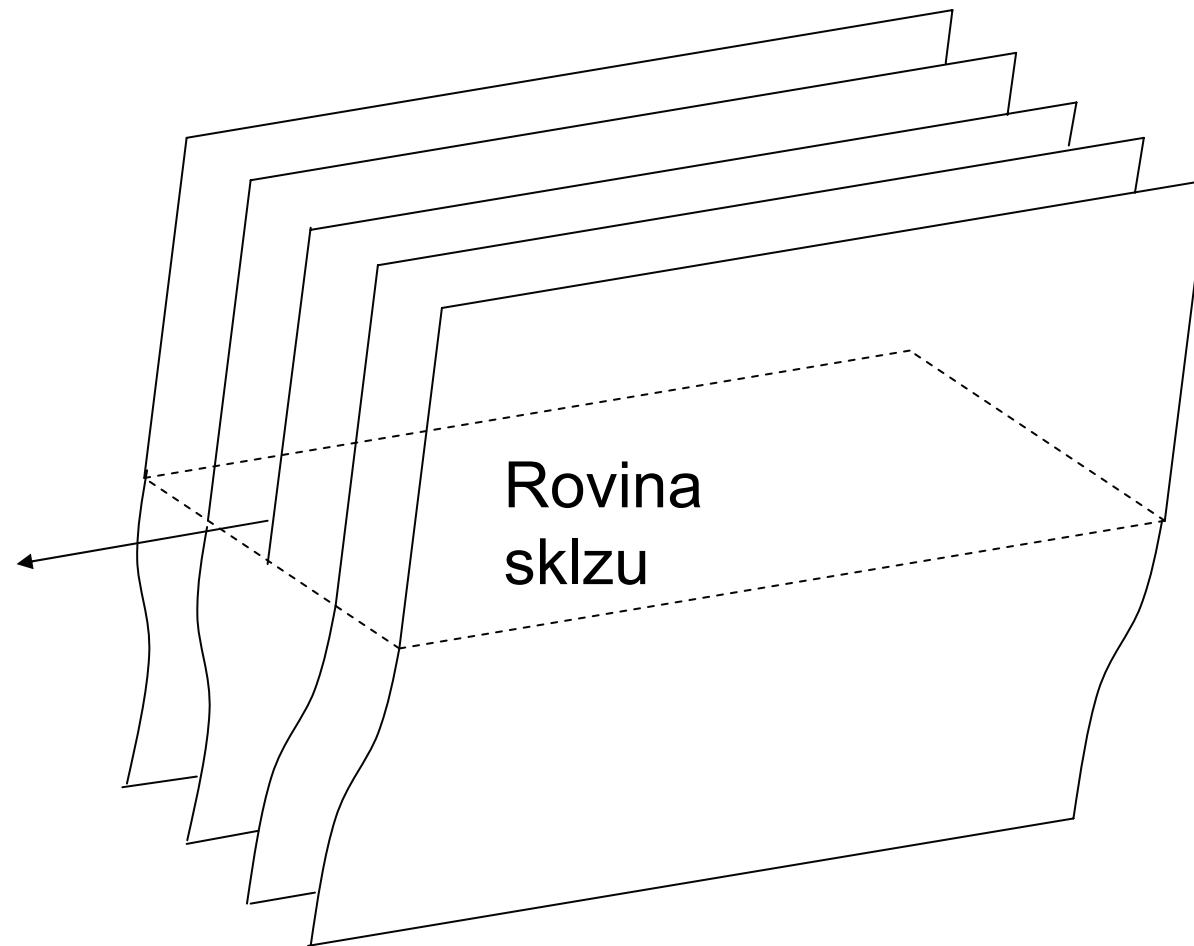


## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Vlastnosti dislokácií:
  - Pohyb
  - Napät'ové pole
  - Energia
  - Sila pôsobiaca na dislokáciu
  - Vzájomné pôsobenie dislokácií
  - Vplyv povrchu
  - Peierls-Nabarrovo napätie

## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Pohyb dislokácií:





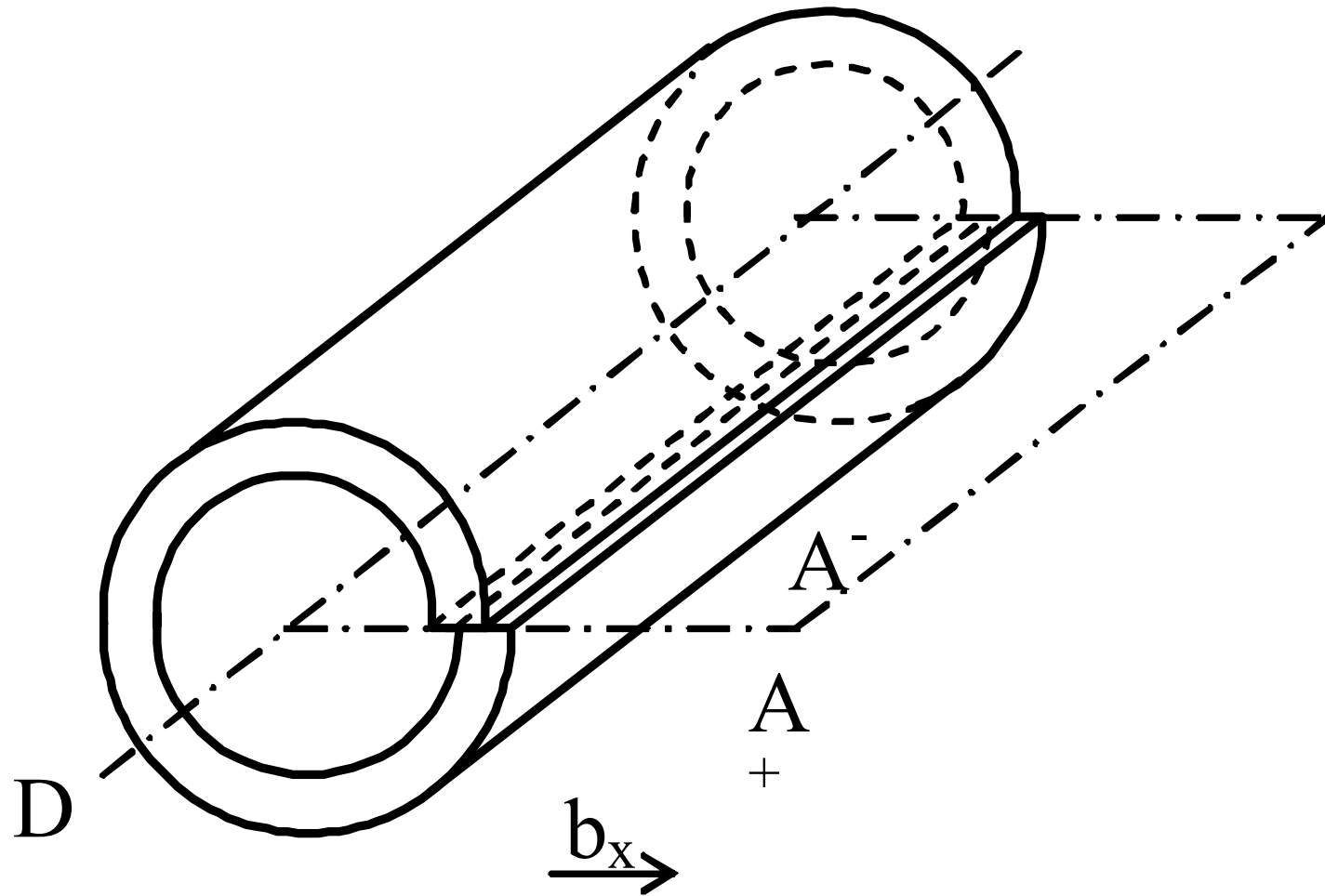
## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Pohyb dislokácií:
  - dislokácie majú schopnosť pohybu pri pôsobení napätia. Pri pohybe môže meniť tvar
- Pohyb sklzový: pohyb v sklzovej rovine
  - príčina: vonkajšie alebo vnútorné sily
- Šplhanie dislokácií: kolmo na sklzovú rov.
  - Difúzia, vyššie teploty



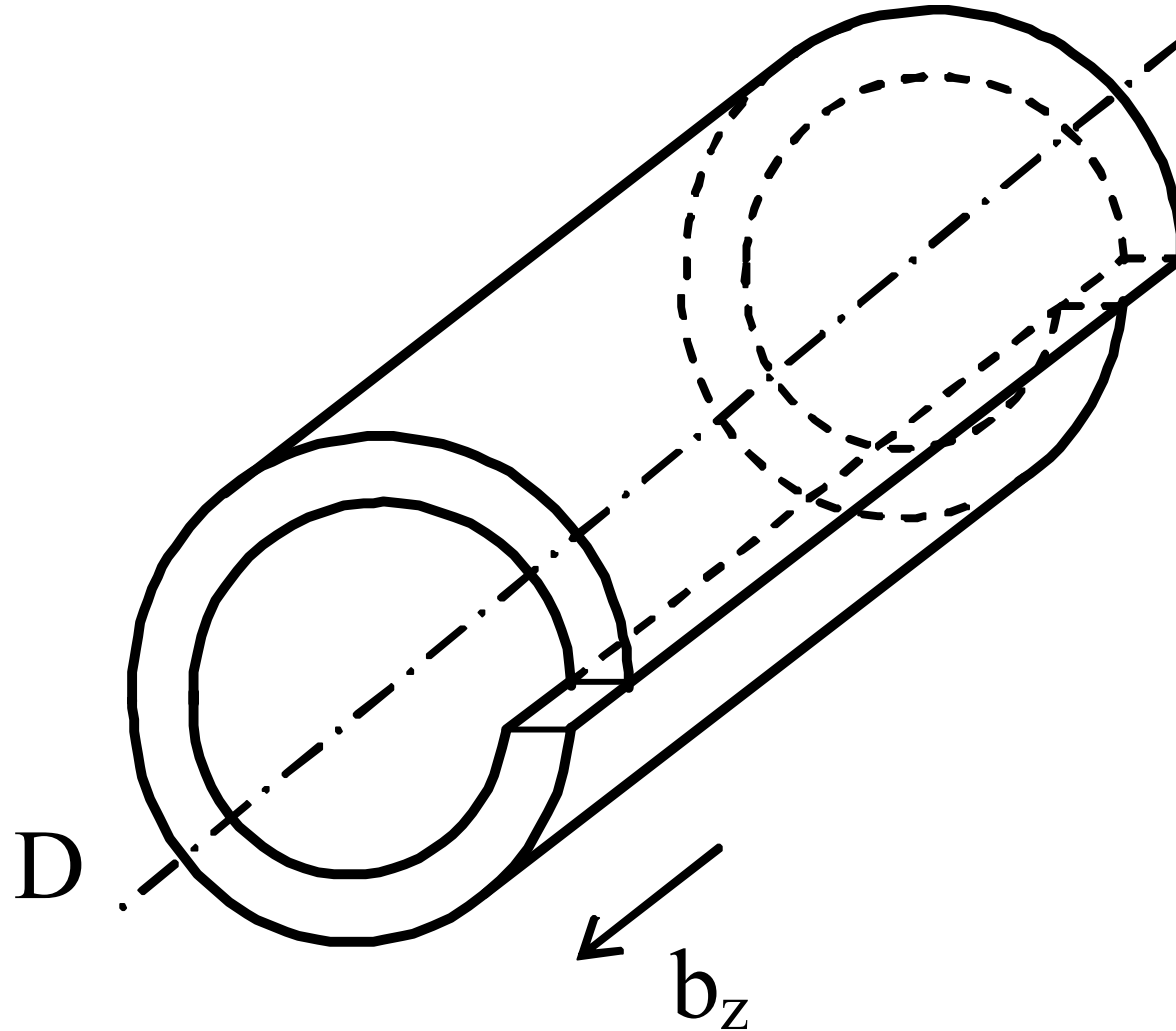
## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Napätové pole dislokácie (skrutkovej):



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Napätové pole dislokácie (hranovej):





## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Napät'ové pole dislokácie (skrutkovej):

$$\sigma_{z\Theta} = \frac{Gb}{2\pi r}$$

- $G$  = modul pružnosti v šmyku
- Ostatné zložky rovné nule



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Napätové pole dislokácie (skrutkovej) v XYZ:

$$\sigma_{XZ} = \sigma_{ZX} = -\frac{Gb}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2}$$

$$\sigma_{YZ} = \sigma_{ZY} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2}$$

$$\sigma_{XX} = \sigma_{YY} = \sigma_{ZZ} = \sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0$$

## 3.5 Poruchy v kryštáloch

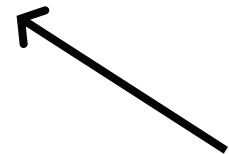
- Napät'ové pole dislokácie (hranovej) v XYZ:

$$\sigma_{XX} = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} y \frac{3x^2 + y^2}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$\sigma_{YY} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} y \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} x \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2}$$

$$\sigma_{ZZ} = \nu(\sigma_{XX} + \sigma_{YY})$$



Poissonovo číslo



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Energia dislokácie:
  - Elastická deformácia → vykonanie práce proti vnútorným napät'ovým poliam. V deformovanom telese sa ukladá energia. Energia na jednotku objemu:

$$u = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^3 \sigma_{i,k} \varepsilon_{i,k}$$

Kde  $\sigma_{ik}$  sú zložky napätia a  $\varepsilon_{ik}$  zložky deformácie





## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Energia dislokácie:
  - postup: energia pre jednu dislokáciu, rozdelenie na zložky (jadro + mimo jadra), rozdelenie podľa charakteru dislokácie (hranová, skrutková, zmiešaná)  
→ výsledok:
  - Celková elastická energia:

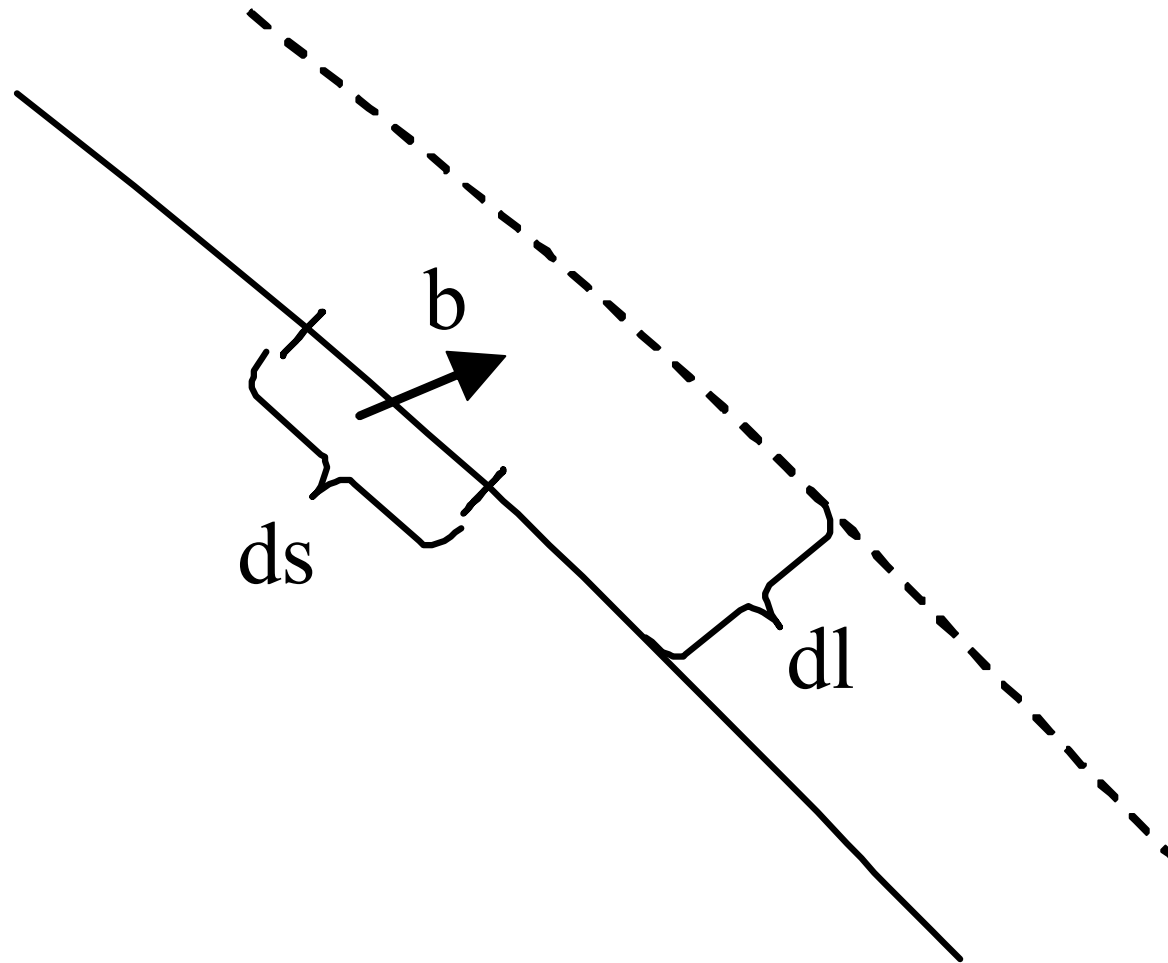
$$U_s = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln\left(\frac{R}{R_j}\right) (1 - \nu \cdot \cos^2 \Phi)$$

*t.j.*

$$U_s = \alpha \cdot G \cdot b^2 \quad \text{kde } \alpha \in (0,5 \div 1)$$

## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Sila pôsobiaca na dislokáciu:





## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Sila pôsobiaca na dislokáciu:
  - Dislokácia sa pohybuje v sklzovej rovine vplyvom homogénneho napätia  $\tau \rightarrow$  ak sa element  $ds$  posunie o  $dl \rightarrow$  v ploche  $dsdl$  vznikne posunutie o  $b$  v smere  $\mathbf{b}$  pričom naň pôsobí elementárna sila  $\tau dsdl$ .
  - Práca vykonaná takouto silou je:  
$$dW = \tau \cdot ds \cdot dl \cdot b$$
  - alebo:  
$$dW = F^S \cdot dl$$
  - Sila pôsobiaca na dislokáciu jednotkovej dĺžky je:  
$$F = F^S/ds = \tau \cdot b$$

Táto sila je vždy kolmá na dislokačnú čiaru a mieri do nedeformovanej časti sklzovej roviny



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Vzájomné pôsobenie medzi dislokáciami:
  - napäťové polia → vzájomné pôsobenie
  - rovnaké znamienko: odpudzovanie
  - rôzne znamienko: priťahovanie
- Napr.:
  - dve dislokácie, pri veľkej vzdialenosti je ich celková energia na jednotku dĺžky  $2\alpha \cdot G \cdot b^2$ :
  - ak sú blízko, majú Burgersov vektor  $2\mathbf{b}$  → ich celková energie je potom  $\alpha \cdot G \cdot (2b)^2$
  - ak sú Burgersove vektory opačne orientované →  
 $\mathbf{b} + (-\mathbf{b}) = 0$

## 3.5 Poruchy v kryštáloch

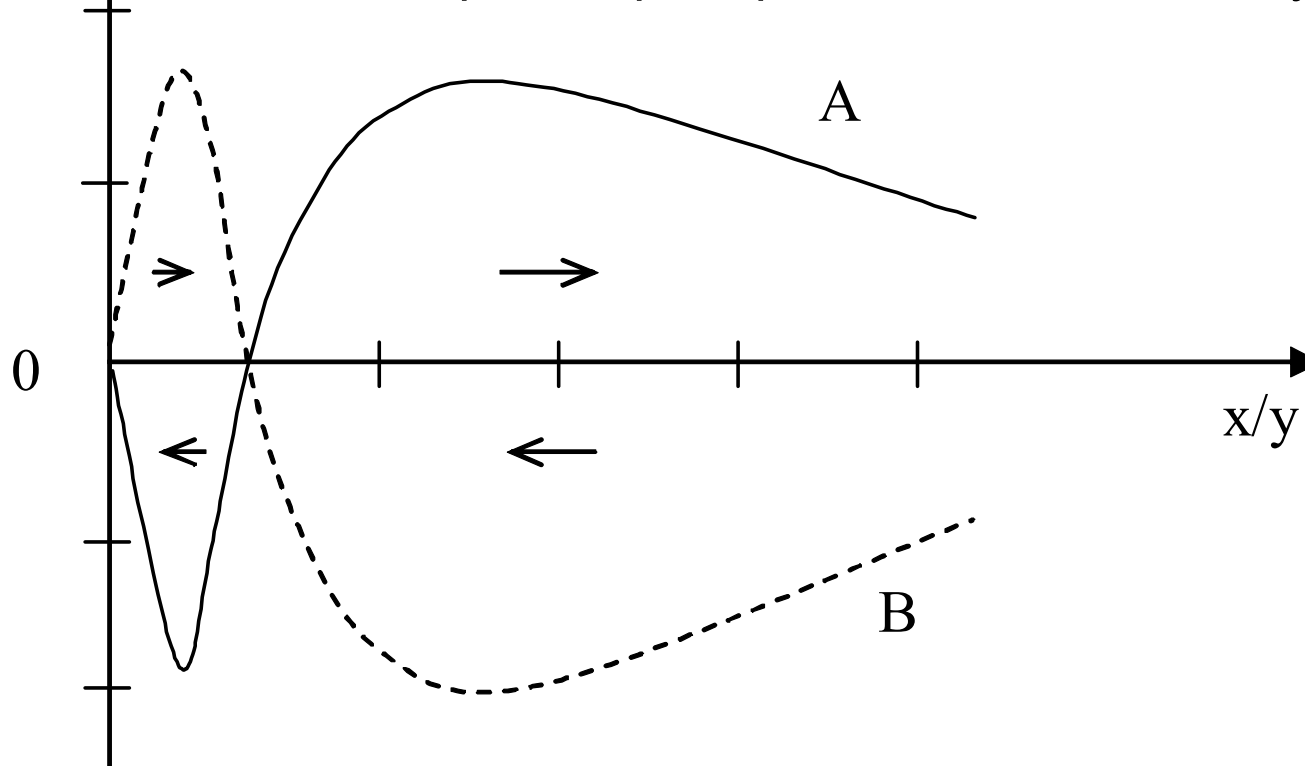
- Vzájomné pôsobenie medzi dislokáciami:
  - Sila pri hranovej dislokácii:

$$F_x = \frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)} x \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2}$$

## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Vzájomné pôsobenie medzi dislokáciami:
  - Sila pri hranovej dislokácii:

- Stabilná poloha pre rovnaké znamienko:  $x = 0$
- Stabilná poloha pre opačné znamienko:  $x = y$





## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Vplyv povrchu na dislokáciu:
  - Dislokácia s dislokačnou čiarou  $S$  a Burgersovým vektorom  $\mathbf{b}$  → poznáme jej pole napätí v  $\infty$  priestore  $\sigma_{ij}^0$
  - Hľadáme  $\sigma_{ij}$  v konečnom telese obmedzenom povrchom  $S$  → výsledok:
  - vplyv „prídavného“ poľa:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \sigma'_{ij}$$

Prídavné pole

špeciálna kapitola: vplyv povrchu na dislokáciu v tenkých fóliách

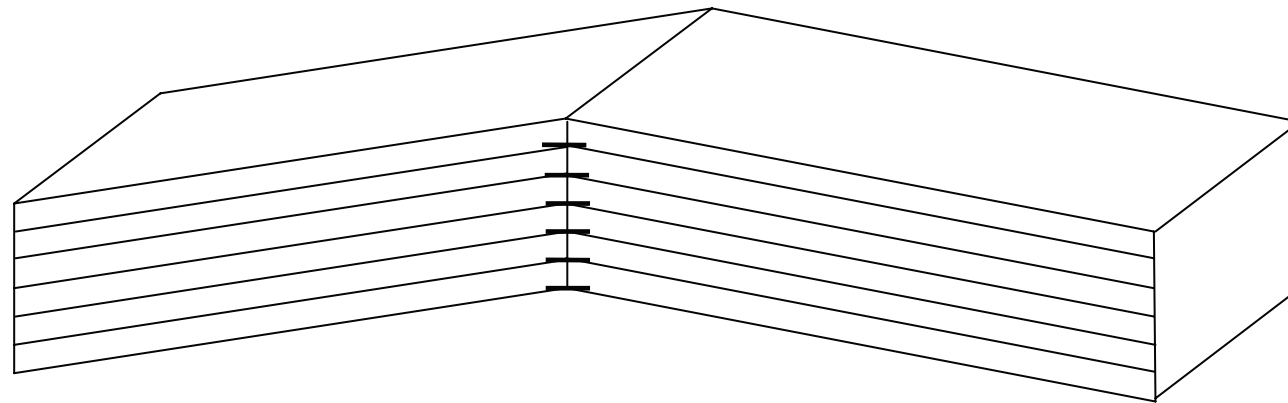
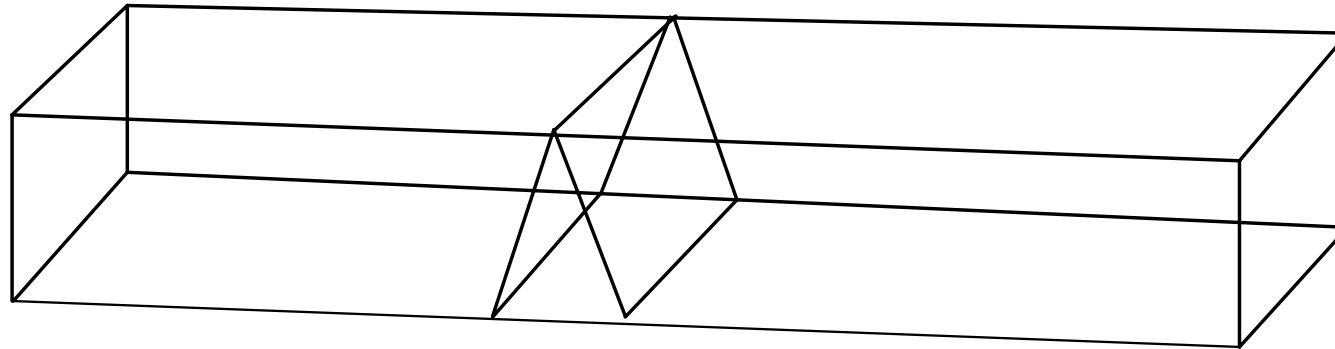


## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Peierls-Nabarrovo napätie (PN napätie):
  - Peierls-Nabarrovo napätie je šmykové napätie  $\tau$  v rovine sklzu, ktoré je potrebné k uvedeniu dislokácie do pohybu pri teplote 0 K v kryštále bez ďalších porúch.
  - Označenie:  $\tau_{PN}$

## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Hranice zrn a subzrn:





## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Hranice zrn a subzrn:
  - Hranice subzrn → oblasti, ktoré oddeľujú jednotlivé dokonalé bloky kryštálu s rozmermi asi  $1e-6$  od seba. Dezorientácia kryštálov je maximálne niekoľko stupňov
  - Hranice zrn → dezorientácia je veľká ( $5^\circ - 10^\circ$  a viac)
  - Hranice zrn výrazne vplyvajú na fyzikálne, chemické, mechanické a iné vlastnosti. Chemické reakcia (oxidácia, korózia) tu prebiehajú rýchlejšie. Je tu väčšia koncentrácia nečistôt
  - Vznik hraníc → pri tuhnutí taveniny, keď prebieha kryštalizácia z rôzne orientovaných zárodokov



## 3.5 Poruchy v kryštáloch

- Objemové (priestorové) poruchy:
  - 3D útvary, ktoré sa výrazne líšia, napr. zložením alebo usporiadaním atómov od základnej stavby kryštálu a výrazne narušujú periodicitu kryštalickej mriežky.
  - Patria sem: precipáty (zrazeniny), zhluky cudzích atómov, zhluky nečistôt, nekovové súčiastky v kovovej hmote a pod.



## 3.6 Štruktúra plastov

- z chemického hľadiska: polyméry (makromolekulárne látky), ich štruktúra sa posudzuje z dvoch hľadísk:
- Molekulárna (vl. molekuly: veľkosť, chemické zloženie, tvar...)
- Nadmolekulárna (vzťahy medzi molekulami)





## 3.6 Štruktúra plastov

- Molekulárna

– Väzby: kovalentná (vnútri makromolekúl)

Van der Waalsova (medzi makromolekulami)  
(pôsobí na väčšie vzdialenosti a je o 1 - 2 rády nižšia)



## 3.6 Štruktúra plastov

- Molekulárna
  - Rozdelenie:
    - Lineárne → monomér má 2 reaktívne (funkčné) miesta
    - Priestorovo sieťované → 3 funkčné miesta
    - Rozvetvené → nie úplne 3D

---

3D polyméry sú netaviteľné a nerozpustné!



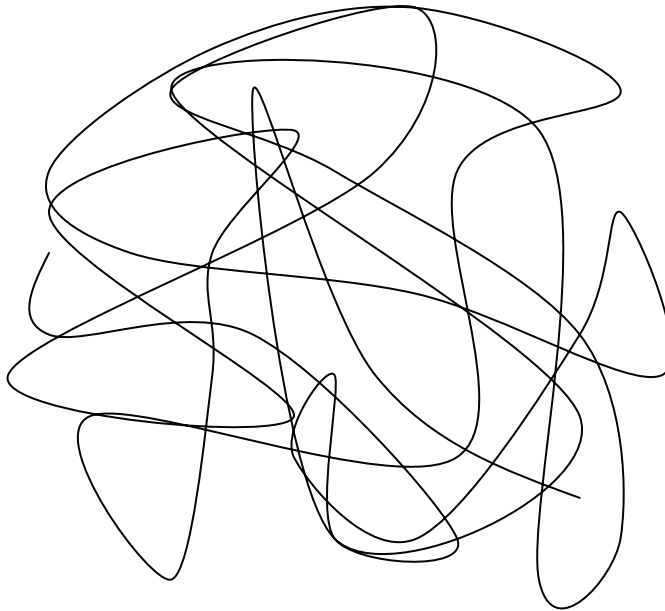
## 3.6 Štruktúra plastov

- Nadmolekulárna
  - amorfná
  - kryštalická

rozdiel: vo vlastnostiach (najmä mechanických)

## 3.6 Štruktúra plastov

- Nadmolekulárna
  - najnižší prvok, t. j. prvok s najnižším (žiadnym) usporiadaním: GLOBULE → útvary, kde makromolekuly sú „zbalené do klobka“



$$S^2 = Na^2 \frac{1 - \cos \beta}{1 + \cos \beta}$$

S – priemer klobka

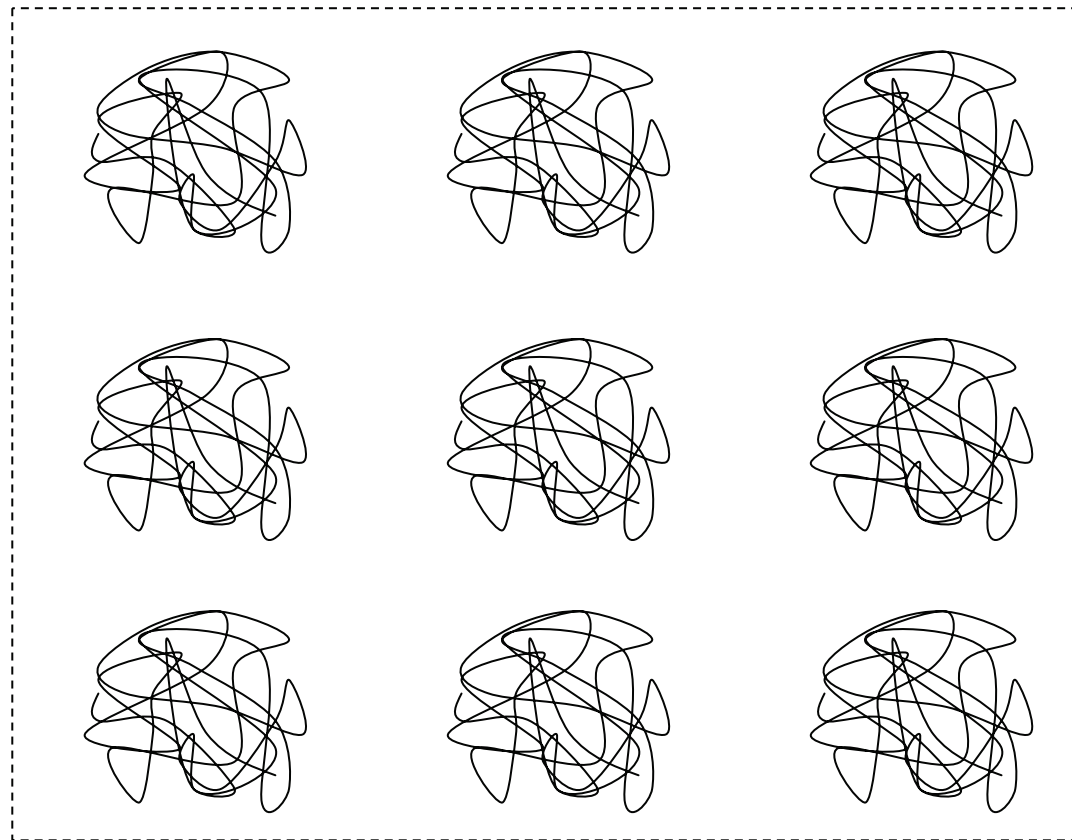
N – počet článkov reťazca

a – dĺžka jedného článku

$\beta$  – uhol medzi susednými väzbami

## 3.6 Štruktúra plastov

- Nadmolekulárna
  - pravidelné usporiadanie globúl:





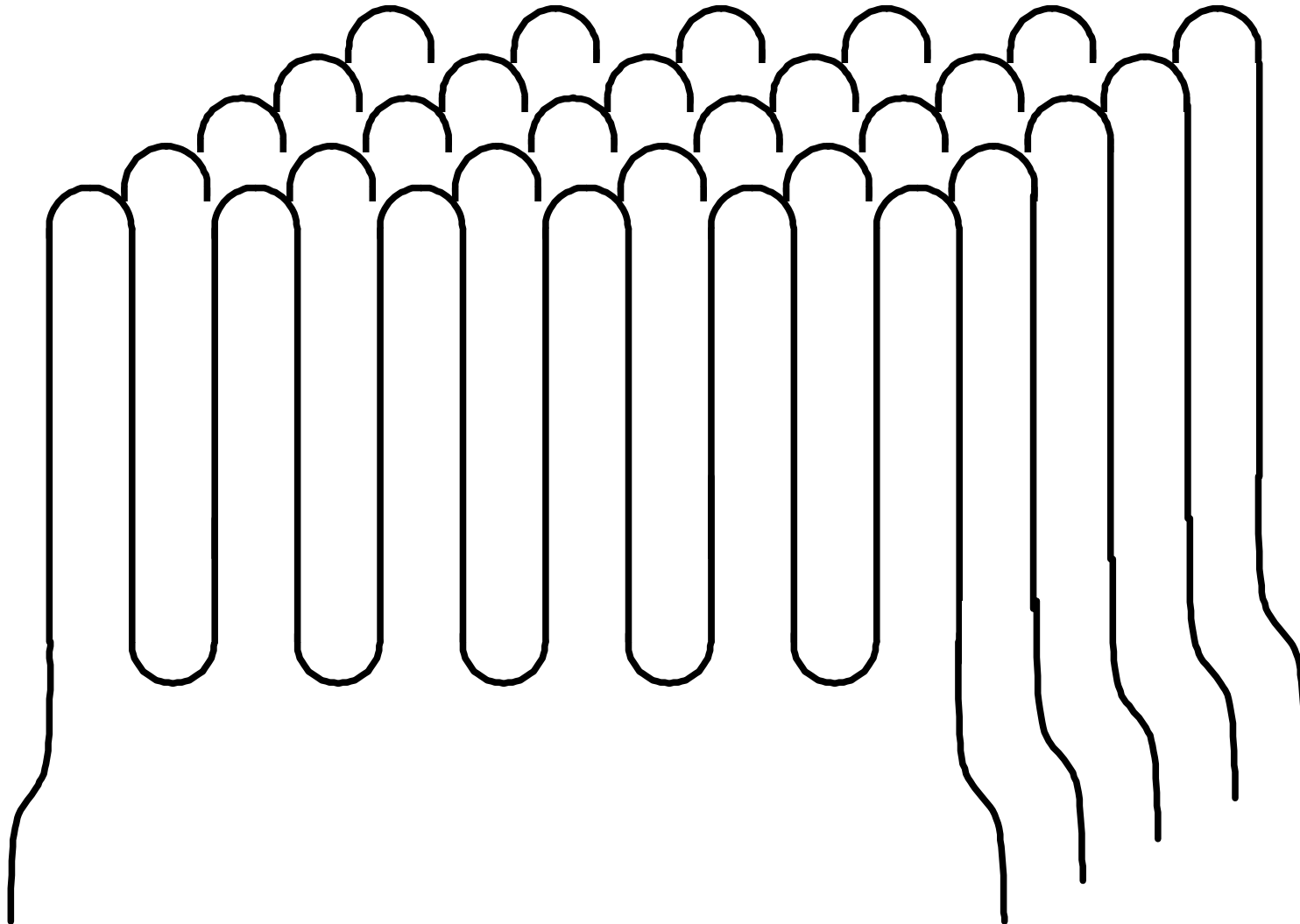
## 3.6 Štruktúra plastov

- Nadmolekulárna
  - kryštalický polymér z kryštalických oblastí, vytvorený pravidelným skladaním (ohýbaním o  $180^\circ$ ) lineárnych makromolekúl do **SEGMENTOV**, ktoré vytvárajú rovinné útvary - **LAMELY**



## 3.6 Štruktúra plastov

- Nadmolekulárna





## 3.6 Štruktúra plastov

- Nadmolekulárna

- na rozdiel od kovov → kryštalizácia polymérov v menej dokonalých sústavách:
  - monoklinická
  - triklinická
  - pseudohehexagonálna
- stupeň kryštalinity: objemový podiel kryštalickej fázy v polymére:

$$c = \frac{d - d_a}{d_k - d_a}$$

$d$ : hustota materiálu

$d_k$ : hustota kryštalickej fázy

$d_a$ : hustota amorfnej fázy



## 3.6 Štruktúra plastov

- „Zaujímavé“ vlastnosti:
  - susedné molekuly sa môžu prakticky neobmedzene deformovať (ak netvorí priestorovú sieť!) → polymérové taveniny
  - pri poklese teploty klesá kinetická energia → presadzujú sa medzimolekulárne sily → pravdepodobnosť posunu molekúl malá, pravdepodobnosť posunu kratších segmentov veľká:
    - VISKOELASTICKÝ (KAUČUKOVITÝ) stav:
      - pri rýchlej deformácii: správanie sa kaučuku
      - pri pomalej: správanie sa taveniny
    - materiál nie je schopný dlhodobo prenášať napätie

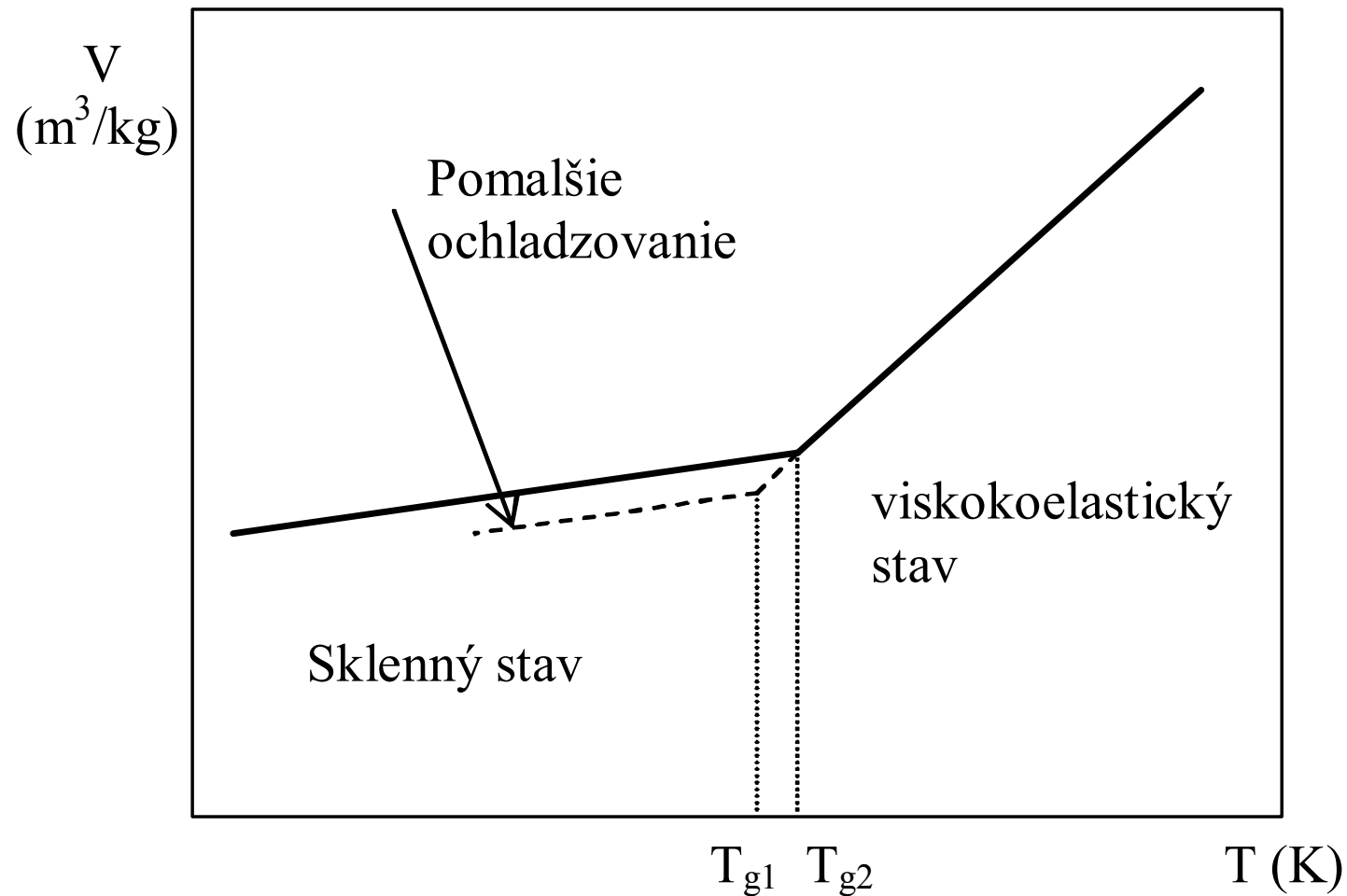


## 3.6 Štruktúra plastov

- „Zaujímavé“ vlastnosti:
  - materiál je schopný dlhodobo prenášať napätie, ak sa jedná o priestorovú sieť (ELASTOMERY, GUMY)
  - pri ďalšom poklese teplôt → kinetická energia neprekoná medzimolekulárne sily → amorfný sklenený stav.

## 3.6 Štruktúra plastov

- „Zaujímavé“ vlastnosti:
  - podobná je aj závislosť merného objemu na teplote:



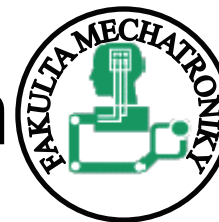
## 4. Vlastnosti kovov a ich zliatin



- KOVY (Všeobecný encyklopedický slovník):
  - veľká skupina chemických prvkov, ktoré majú vo vonkajšej vrstve malý počet elektrónov (s výnimkou vodíka a hélia), ktoré ľahko odštiepajú počas tvorby kationov. Majú niektoré charakteristické vlastnosti ako napr. dobrú tepelnú a elektrickú vodivosť, lesk, tvárnosť, húževnatosť, tavitel'nosť, zlievateľnosť ako aj nízku ionizačnú energiu.



## 4. Vlastnosti kovov a ich zliatin



Kovy	Nekovy
Lesklé	Nelesklé
Kujné a ťažné	Nie sú kujné a ťažné
Veľká hustota	Malá hustota
V zlúčeninách → katióny	V zlúčeninách → anióny
Redukovadlo	Oxidovadlo
Zásadotvorné	Kyselinotvorné

## 4. Vlastnosti kovov a ich zliatin



- Zopár pojmov:
  - Vlastnosti:
    - štruktúrne necitlivé (merná hustota, bod topenia...)
    - štruktúrne citlivé (pevnosť, tvrdosť, el. vodivosť...)
  - Anizotropia: rozličné vlastnosti v rôznych kryštalografických smeroch (pri kryštáloch s inou mriežkou ako je kubická)
  - Izotropia: rovnaké vlastnosti vo všetkých smeroch

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- merná hmotnosť: [kg/m<sup>3</sup>]
  - ľahké kovy Hranica: 5e3 kg/m<sup>3</sup>
  - ťažké kovy

- modul pružnosti v ťahu: E [MPa]

- modul pružnosti v strihu: G [MPa]

- pomerné predĺženie:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

- pomerné zúženie:

$$\eta = \frac{\Delta b}{b_0}$$

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- modul pružnosti E, G [MPa]
  - až po určitú hodnotu napätia (sila na jednotkovú plochu,  $R = F/S$ ) je pomerná deformácia priamo úmerná napätiu(??!!)

$$\varepsilon = \alpha \cdot R \quad \text{Hookov zákon}$$

- platí aj:

$$\eta = \nu \cdot \varepsilon \quad \text{kde } \nu \text{ je Poissonovo číslo}$$

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- modul pružnosti E, G

[MPa]

- v rozmedzí Hookovho zákona:

$$E = \frac{1}{\alpha} \Rightarrow E = \frac{R}{\varepsilon}$$

- definícia: MPv $\check{T}$  je fiktívne napätie, ktoré by vyvolalo predĺženie  $\varepsilon=1$ , t. j. tyž by mala dvojnásobok pôvodnej dĺžky.

- Pre polykryštalické látky MPvS:

$$G = \frac{E}{2(\nu + 1)}$$

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- modul pružnosti E, G

[MPa]

pre väčšinu kovov:  $G = 0,373 E$ ,  $\nu = 0,33$

horniny a sklo:  $\nu = 0,25$

plastické látky:  $\nu = 0,5$



## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- modul objemovej pružnosti K [MPa]
  - merná veličina objemovej tuhosti látok pri namáhaní všestranným tlakom:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- objemová teplotná rozťažnosť  $\vartheta$  [K<sup>-1</sup>]

$$\vartheta = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT}$$

$V_0$  pôvodný objem

$dV$  zmena objemu v závislosti od zmeny teploty  $dT$

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- dĺžková teplotná rozťažnosť  $\alpha$  [K<sup>-1</sup>]

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$$

hodnota  $\alpha$  sa mení s teplotou → priemerný súčiniteľ  $\alpha^+$ :

$$l = l_0(1 + \alpha^+(t_1 - t_0))$$

u izotropných materiálov:

$$\vartheta = 3 \cdot \alpha$$

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- merné teplo  $c$ : [Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]
  - teplo potrebné dodať 1 kg kovu k jeho ohriatiu o 1 K
- teplota topenia: [°C]
  - kovy s nízkou teplotou topenia
  - strednou teplotou topenia
  - vysokou teplotou topenia
  - závisí od väzieb medzi atómami

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- vplyv vonkajšieho elektrického poľa:
  - elektróny sa zoskupujú tak, že môžu nadobúdať spojito vzrastajúce hodnoty energie → **vodivá látka**
  - ak sa to nedá → **nevodivá látka**
  - pri významnom obmedzení možností zvyšovania energie vodivostných elektrónov → **polovodič**



## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti

- merná elektrická vodivosť  $\sigma$ : [S/m]
  - charakterizuje materiál z hľadiska vedenia el. prúdu
- merný odpor  $\rho$ : [ $\Omega$ /m]
  - odpor vodiča o dĺžke 1 m s prierezom 1 mm<sup>2</sup>

$$\rho = \frac{m \cdot v}{n \cdot e^2 \cdot l}$$

n	počet elektrónov v jednotke objemu
m	hmotnosť elektrónu
e	náboj elektrónu
l	stredná voľná dráha elektrónov
v	stredná rýchlosť pohybu elektrónov

atómy cudzích prvkov zvyšujú elektrický odpor materiálu!!!



## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- supravodivosť:
  - skokovitý pokles elektrického odporu o 7 a viac rádov (pri teplotách blízkych absolútnej nule)
- tepelná vodivosť  $\lambda$ :
  - schopnosť látky prenášať kinetickú energiu neusporiadaného pohybu medzi atómami vedením

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- magnetické vlastnosti:
  - dôsledok elektromagnetického pôsobenia elektrónov, pohybujúcich sa okolo jadier atómov. Elektrický náboj elektrónu obiehajúceho okolo jadra vytvára prúdovú slučku a patričný magnetický moment. Podobne, spin elektrónu vytvára svoj spinový magnetický moment.

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- magnetické vlastnosti:
  - keď sa kompenzujú spinové momenty → DIAMAGNETICKÁ látka
  - PARAMAGNETIZMUS → nevykompenzované magnetické momenty, navonok však výsledok nulový
  - FEROMAGNETIZMUS → súbežná orientácia spinových momentov
  - ANTIFEROMAGNETIZMUS → antiparalelné vykompenzovanie mg. momentov
  - FERIMAGNETIZMUS → antiparalelné usporiadanie, avšak výsledok nie je nulový → **ferity**

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- odolnosť voči korózii:
  - KORÓZIA → chemická (elektrochemická) reakcia na povrchu kovu, pri ktorom kov prechádza do oksyločeneého stavu
  - ERÓZIA → druh mechanického opotrebenia na povrchu materiálu, účinkom dopadajúcich tvrdých častíc
  - CHEMICKÁ KORÓZIA → vzniká v plynnom, kvapalnom prostredí, na mieste kde prebehla vznikajú splodiny
  - ELEKTROCHEMICKÁ KORÓZIA → súvisí s prechodom elektrického prúdu

## 4.1 Niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti



- odolnosť voči korózii:
  - ELEKTROCHEMICKÁ KORÓZIA
    - anódová reakcia → oxidácia kovu → korózia
    - katódová reakcia → redukcia oxidujúcej zložky roztoku (napr. redukcia kyslíka rozpusteného v elektrolyte)
  - môže vzniknúť aj spojením dvoch kovov v koróznom prostredí → **korózny mikročlánok**, pričom anódová reakcia sa sústreďuje na menej ušľachtilý kov (podobne aj spojenie rôznorodých častí materiálu môže vytvárať podmienky pre vznik korózneho mikročlánku)

## 4.2 Deformácie

- Elastická
- Anelastická
- Plastická







## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia

Fyzikálny proces: relatívne malý posuv atómov z rovnovážnej polohy v dôsledku pôsobenia vonkajších síl

Navonok: zmena tvaru  
zmena objemu

Vratný proces → po odstránení síl sa rozmery telesa vrátia späť



## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia

pri pôsobení síl vznikajú v telese napätia:

deformácia  $\rightarrow$  tenzor  $\epsilon_{ij}$

napätie  $\rightarrow$  tenzor  $\sigma_{ij}$

pre malé deformácie  $|\epsilon_{ij}| \ll 1$  platí lineárny vzťah medzi deformáciou a napätím (Hookov zákon)

## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia

Izotropné prostredie:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E} (\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33}))$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E} (\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33}))$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{1}{E} (\sigma_{33} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{11}))$$

$$\varepsilon_{23} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{23}$$

$$\varepsilon_{13} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{13}$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{12}$$



## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia

Napr.: pre jednoduchý ťah v smere osi „x“:

$$\sigma_{11} \neq 0$$

$$\text{ostatné } \sigma_{ij} = 0$$



$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E}$$

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\nu \frac{\sigma_{11}}{E} = -\nu \varepsilon_{11}$$



## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia

Napr.: pre jednoduchý ťah v smere osi „x“

E je potom konštanta úmernosti medzi napätím a deformáciou ( $\sigma_{11} = \varepsilon_{11} \cdot E$ ) a  $\nu$  je pomer priečného skrátania k pozdĺžnemu predĺženiu

$$(\nu = -\varepsilon_{22}/\varepsilon_{11})$$

Fyzikálne:  $\nu > 0$   
 $E > 0$

Niekedy sa namiesto E a  $\nu$  používajú modul pružnosti v šmyku G, resp. modul objemovej pružnosti K



## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia
- V jednotke objemu elasticky deformovaného telesa je vložená vnútorná energia  $W$ , vytvorená prácou vonkajších síl  $\rightarrow$  hustota deformačnej energie:

$$W = \frac{1}{2}(\sigma_{11} \varepsilon_{11} + \sigma_{22} \varepsilon_{22} + \sigma_{33} \varepsilon_{33} + 2\sigma_{23} \varepsilon_{23} + 2\sigma_{13} \varepsilon_{13} + 2\sigma_{12} \varepsilon_{12})$$

(platí aj pre anizotropné prostredie)





## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia

Anizotropné prostredie:

$$\varepsilon_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad \text{alebo} \quad \varepsilon_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

kde elastické konštanty sú:

$S_{ijkl}$  = tenzor elastickej poddajnosti

$C_{ijkl}$  = tenzor elastickej tuhosti



## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia

Anizotropné prostredie:

platí zákon symetrie:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

potom:

$$\sigma_{11} = \sigma_1$$

$$\sigma_{22} = \sigma_2$$

$$\sigma_{33} = \sigma_3$$

$$\sigma_{23} = \sigma_{32} = \sigma_4$$

$$\sigma_{13} = \sigma_{31} = \sigma_5$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_6$$

podobne aj pre  $\varepsilon$



## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia

Anizotropné prostredie:

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^6 S_{ij} \sigma_j \quad \text{alebo} \quad \sigma_i = \sum_{j=1}^6 C_{ij} \varepsilon_j$$



## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia

Tepelné pnutie:

Napätia vznikajú aj vnútorným pnutím (teplota, okolie mriežkových porúch ...) → stredná hodnota je nulová (podm. rovnováhy telesa)

Voľné homogénne teleso → homogénne rozloženie teploty (lineárne rozloženie teploty) → nevzniká pnutie (teleso sa môže voľne roztáhať)



## 4.2 Deformácie

- Elastická deformácia = pružná deformácia

Tepelné pnutie:

a, upnuté teleso

napätie v tyči  $\sigma = -\alpha \cdot \Delta T \cdot E$

b, povrchové ochladenie

$$\sigma = \frac{-\Psi \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot E}{1 - \nu}$$



## 4.2 Deformácie

- Plastická deformácia

Ak napätie prekročí hodnotu medze sklzu (medze pružnosti) dôjde k plastickej deformácii → po odľahčení zostáva trvalá deformácia tvaru telesa.

Najčastejšie: dislokačný sklz, pre kovy:

$$\tau_{PN} = 10 \text{ MPa}$$

toto sú malé napätia → pri nenulovej teplote budú ešte menšie → dislokácie sa chovajú ako voľne pohyblivé → kovy sú tvárne





## 4.2 Deformácie

- Plastická deformácia

O medzi sklzu rozhoduje:

vzájomná interakcia dislokácií

interakcia dislokácií s ostatnými poruchami

hranice zrn

atď.



## 4.2 Deformácie

- Plastická deformácia

Pri plastickej deformácii nedochádza k zmene objemu!

$$\nu = 0,5 (\pm 2\%)$$



## 4.2 Deformácie

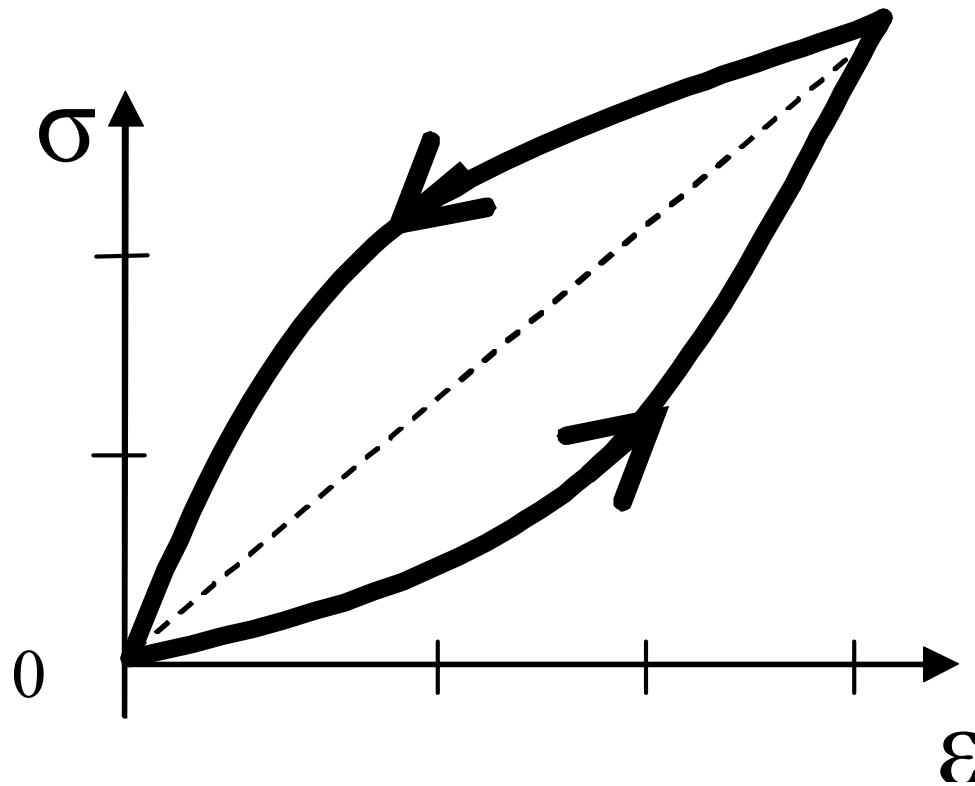
- Anelastická deformácia

Priama úmera medzi napätím a deformáciou?

Presné meranie → odklon od Hookovho zákona

## 4.2 Deformácie

- Anelastická deformácia



opakované zaťaženie  
→ existencia  
deformačnej  
hysteréznej slučky →  
jej plocha je úmerná  
energii absorbovanej  
materiálom →  
**ANELASTICITA**  
(dopružovanie)



## 4.2 Deformácie

- Anelastická deformácia

Príčiny:

Vychyľovanie vonkajších dislokačných segmentov  
→ vrátia sa po odľahčení do pôvodnej polohy,  
avšak tento proces prebieha **po inej krivke** ako  
zaťaženie

Intersticiály náhodne rozložené po zaťažení prijímú  
energeticky výhodnejšiu polohu a spôsobia  
nesymetrické zdeformovanie mriežky. Po  
odľahčení je **návrat späť oneskorený**.



## 4.2 Deformácie

- Anelastická deformácia

Príčiny:

Vyššie rýchlosti deformácie → adiabatický proces →  
objem sa zväčšuje → zníženie teploty →  
tendencia ku zmršťovaniu → ohriatie ... →  
...roztiahnutie ... → ... atď'..., tieto zmeny tiež majú  
**časové oneskorenie** → hysterézia



## 4.2 Deformácie

- Anelastická deformácia – experimentálne:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_\tau \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad \text{pre } 0 < t \leq t_1$$

$$\varepsilon = \varepsilon_\tau e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \quad \text{pre } t > t_1$$

$\varepsilon_0$  – okamžitá pružná deformácia

$t$  – čas po zaťažení

$\varepsilon_\tau$  – časovo závislá zložka deformácie

$\tau$  – doba doprużenia

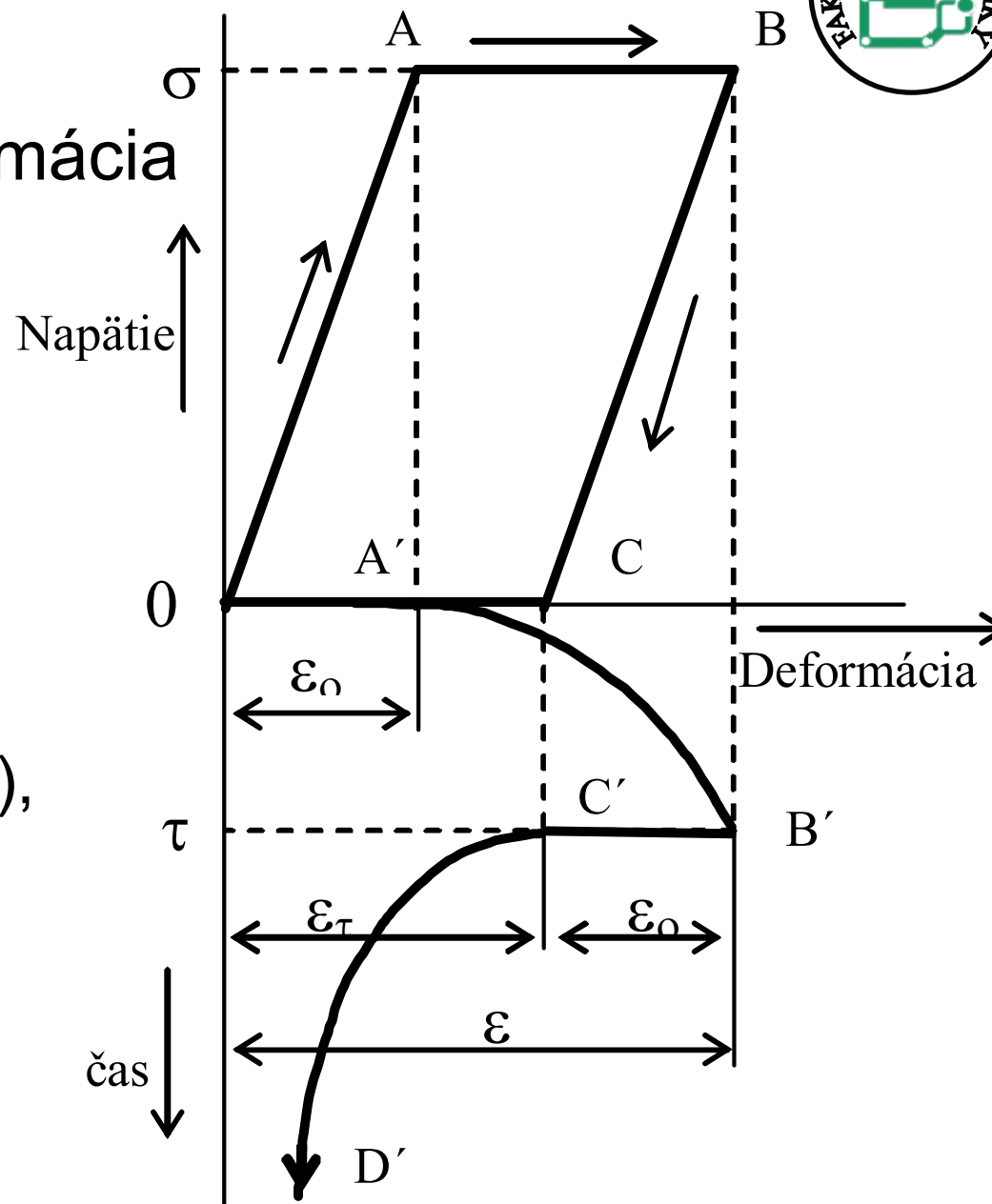
## 4.2 Deformácie

- Anelastická deformácia

$0A \rightarrow$  zaťaženie  
(okamžitá pružná deformácia)

$AB \rightarrow$  časovo závislá deformácia za čas  $t_1$

$B \rightarrow$  odľahčenie ( $R=0$ ),  
deformácia okamžite  
klesne o  $\varepsilon_0$ , zvyšok  
mizne postupne





## 4.2 Deformácie

- Anelastická deformácia

$\tau$  závisí najmä od:

typu anelastických procesov,  
veľkosti pôsobiaceho napätia,  
teploty.



## 4.2 Deformácie

- Anelastická deformácia

Niektoré praktické dôsledky:

sadanie pružín,

relaxácia napätí skrutiek

predpínacie výstuže

poškodzovacie procesy pri opakovanom  
zaťažení (pomer jednotlivých zložiek deformácie)



## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie

Sklz dislokácií (najviac)

Difúzne tečenie (vysoké teploty)

Dislokačné tečenie

Sklz po hraniciach zrn (veľmi vysoké teploty)



## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií

Makroskopicky: tvarová deformácia → zmena tvaru  
nezvratnosť ← vzájomná interakcia dislokácií, resp.  
ich interakcia s inými poruchami, ich výstup na  
povrch





## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií

bežná hustota dislokácií v kryštáloch (po tepelnom spracovaní)  $10^{12} \text{ m}^{-2}$ ,

pri plastickej deformácii ich hustota narastie na  $10^{14} - 10^{15} \text{ m}^{-2}$ ,



## 4.2 Deformácie

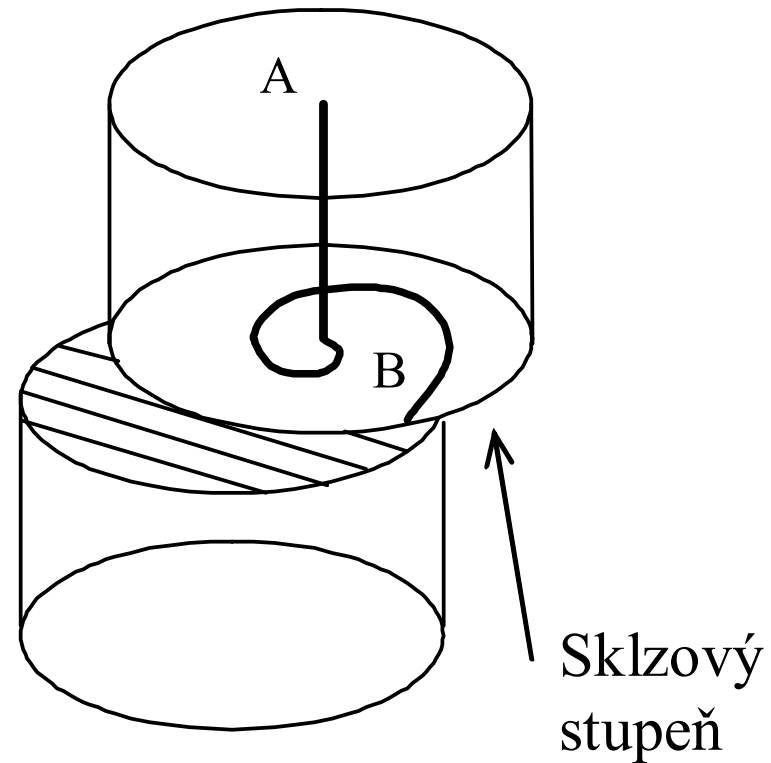
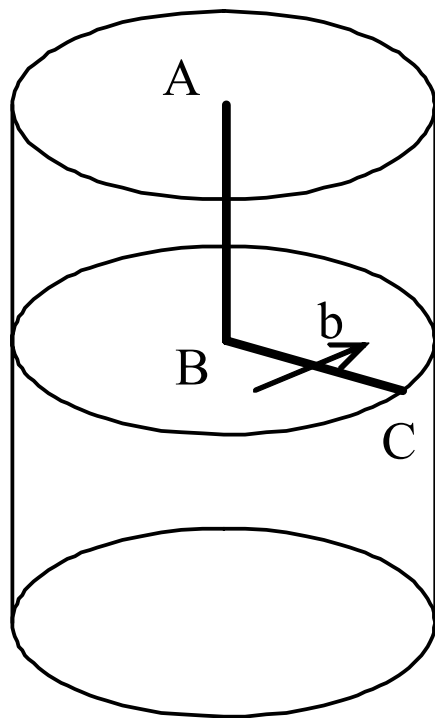
- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií

Existencia multiplikačných mechanizmov, ktorú sú schopné generovať  $10^2 - 10^3$  dislokácií za sebou

- Existujú 2 mechanizmy navrhnuté (popísané) Frankom a Readom:
  - povrchový zdroj
  - Frankov – Readov zdroj
- Zoskupenie dislokácií
- Pretínanie dislokácií
- Tepelne aktivovaný pohyb dislokácií

## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií – Povrchový zdroj





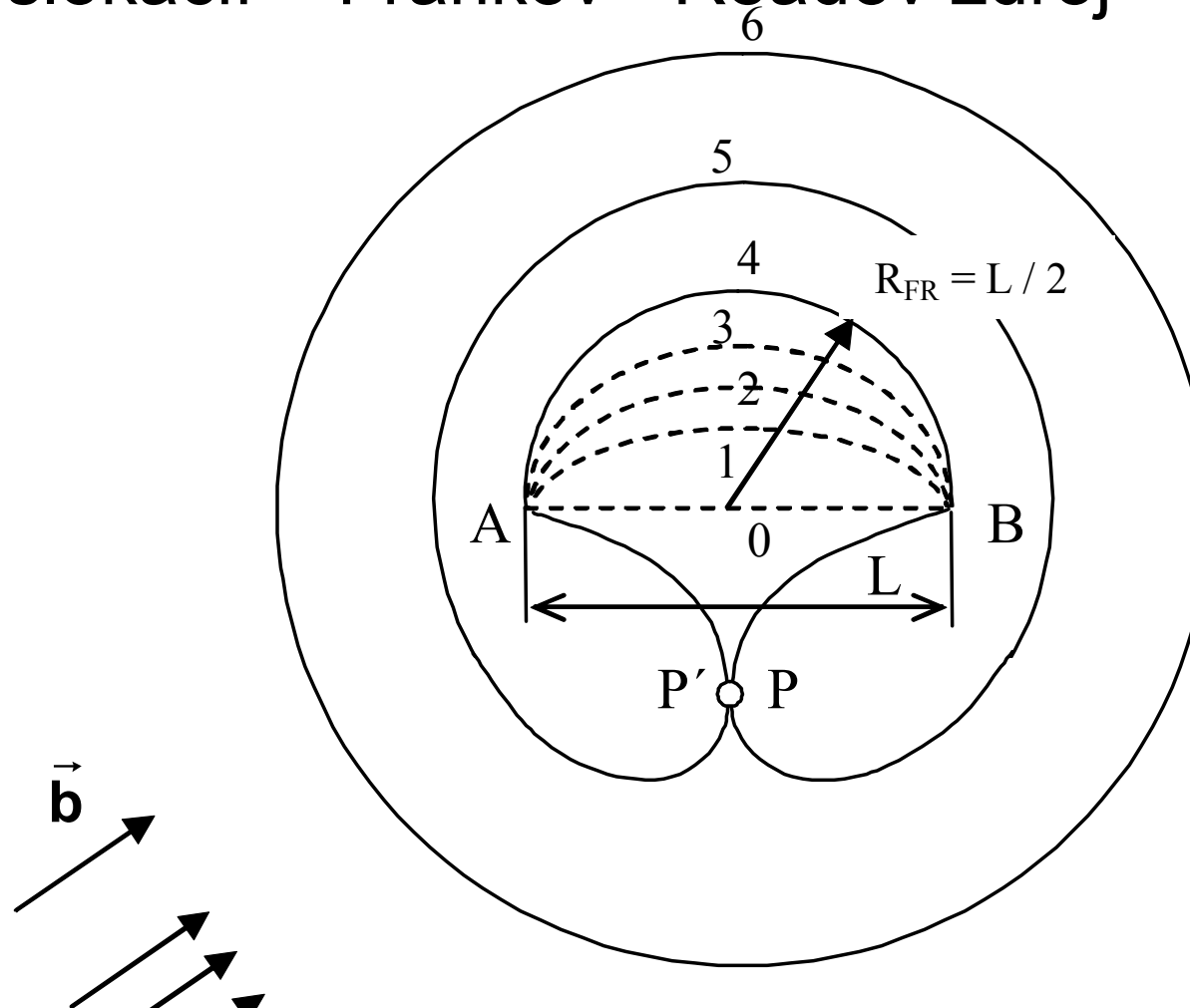
## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií – Frankov - Readov zdroj

Dislokácia ukotvená na oboch koncoch,  
Vplyvom napätia  $\tau$  sa dislokačná čiara môže  
prehýbať, napätie, keď má tvar polkružnice o  
polomere  $L/2$   $\tau_{FR} = Gb/L \rightarrow$  toto napätie je nutné  
pre činnosť FR zdroja dĺžky  $L$

## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií – Frankov - Readov zdroj





## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií – Zoskupenie dislokácií

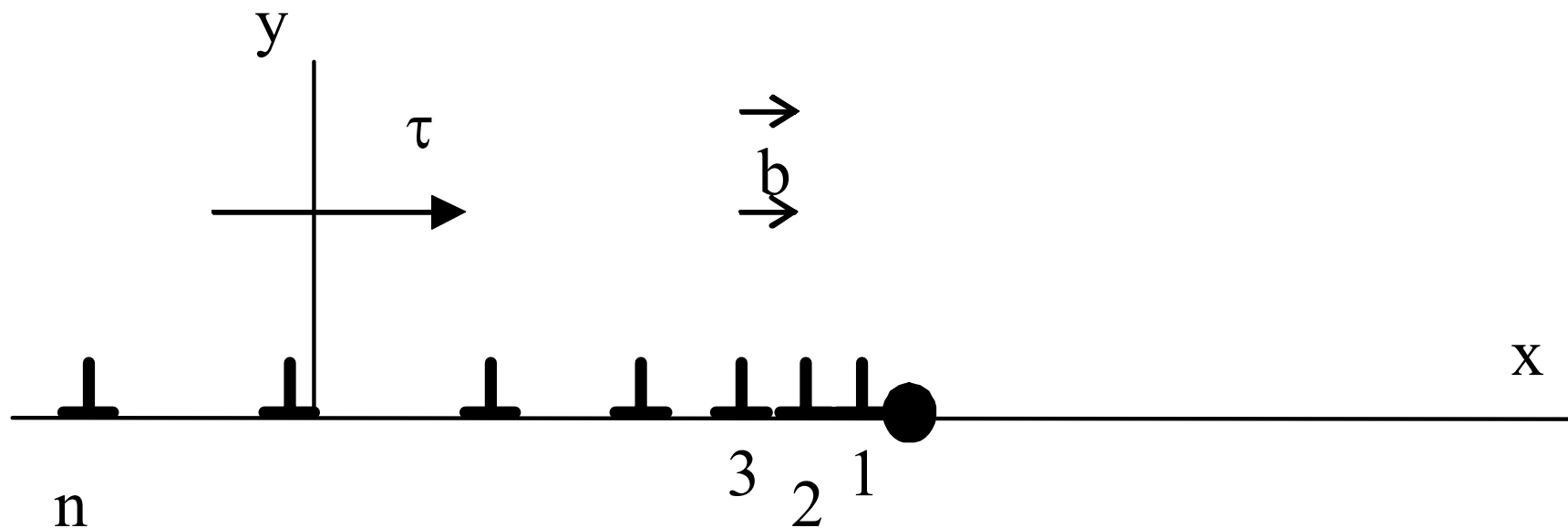
Pri FR zdroji, ak sa vedúca dislokácia zastaví pred prekážkou (hranica zrn) → vzniká zoskupenie dislokácií





## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií – Zoskupenie dislokácií





## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií – Zoskupenie dislokácií

Sila  $F_1$ , ktorou pôsobí  $\tau$  a ostatné dislokácie na vedúcu dislokáciu  $\rightarrow$  pri fiktívnom posunutí dislokácie o  $\Delta x$  sa na posunutie prekážky musí vykonať práca:  $\Delta L = F_1 \Delta x$

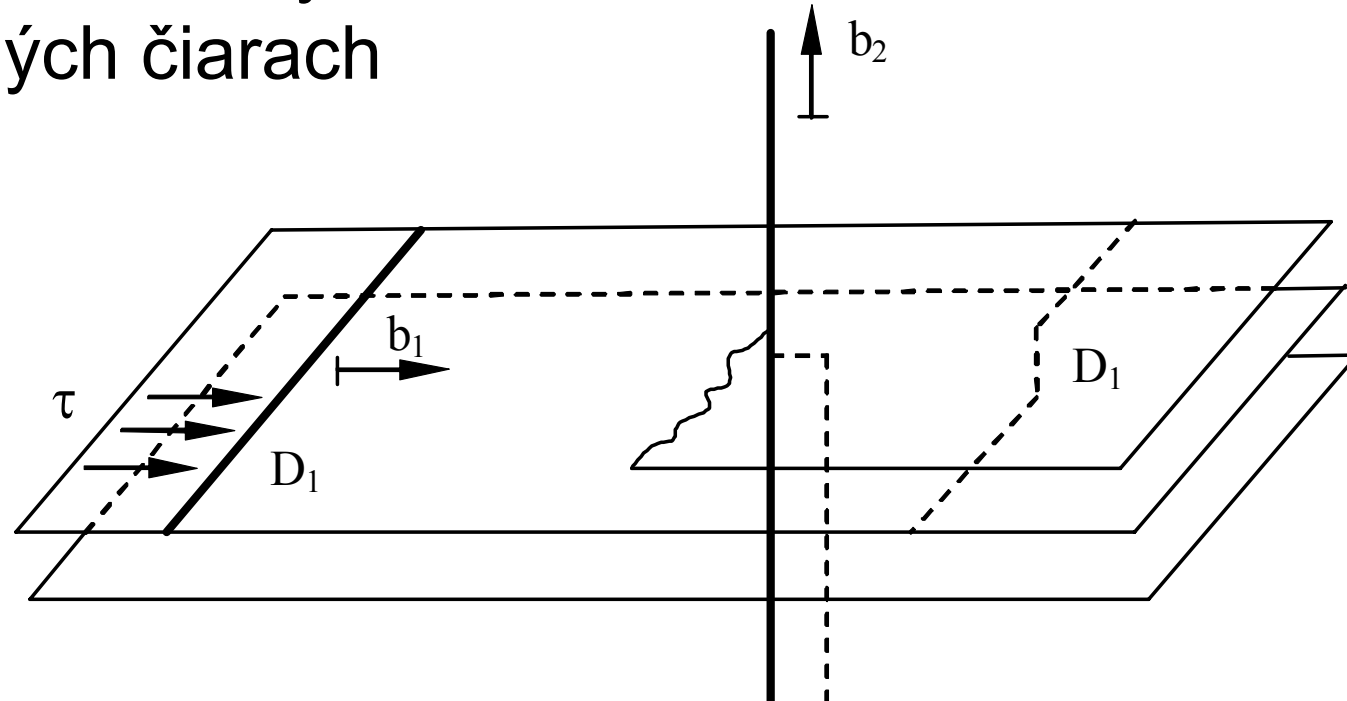
Celé zoskupenie dislokácií sa pritom tiež pohne o  $\Delta x$   $\rightarrow$  vnútorné sily teda konajú prácu  $\Delta L = n F_0 \Delta x$ , kde  $F_0 = b \cdot \tau$  je sila pôsobiaca na každú dislokáciu.

Táto práca sa spotrebuje na posunutie prvej dislokácie spojenej s prekážkou:  $F_1 = n F_0 = n \cdot b \cdot \tau$

## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií – Pretínanie dislokácií

Dislokácie pri svojom pohybe v rovine sklzu pretnú inú dislokáciu → vytvorenie „schodov“ na dislokačných čiarach





## 4.2 Deformácie

- Mechanizmy plastickej deformácie – Sklz dislokácií – Tepelne aktivovaný pohyb dislokácií

Difúzne tečenie → difúzia = proces, keď dochádza k časovej zmene stredných polôh častíc kryštalickej mriežky pri zachovaní štruktúry, teda k pohybu častíc mriežky

(Dislokačné tečenie – pri relatívne vysokých hodnotách zaťažovacieho napätia, v hrubozrnných materiáloch)

Skly po hraniciach zrn → vzájomný pohyb susedných zrn



## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie

V priebehu plastickej deformácie kovov dochádza k rastu aplikovaného napätia s narastajúcou deformáciou → deformačné spevnenie.

Príčiny:

vzájomná interakcia dislokácií

interakcia dislokácií s inými poruchami



## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie

Rozdielne vlastnosti a mechanizmy:

monokryštály čistých kovov

monokryštály zliatin

polykryštály

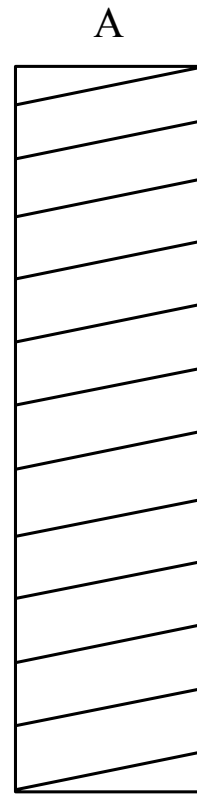


## 4.2 Deformácie

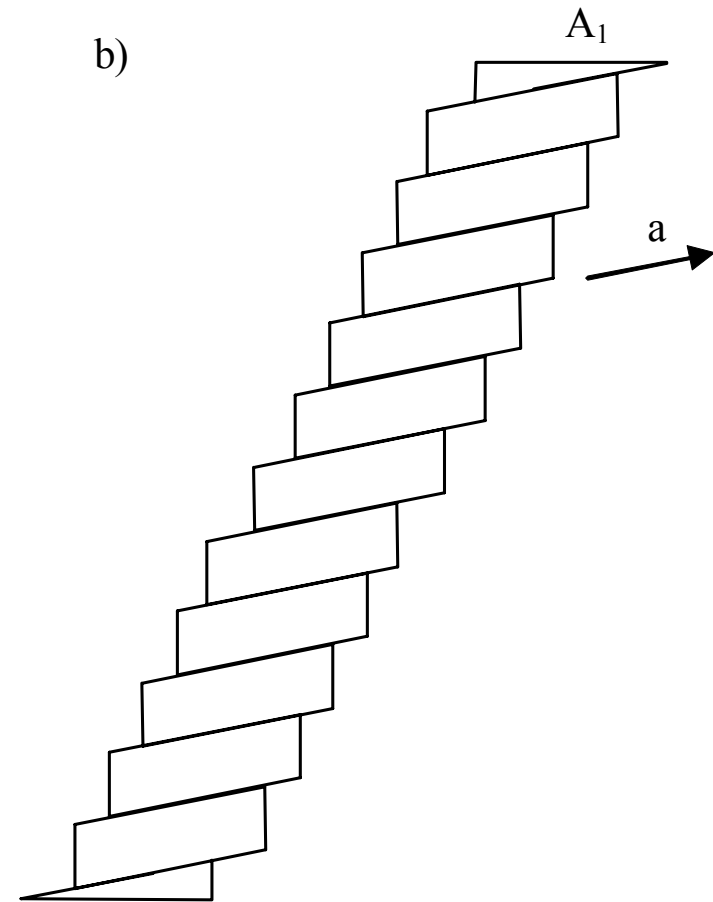
- Deformačné spevnenie – monokryštály čistých kovov

Kryštalická štruktúra sa pri plastickej deformácii nemení!

a)



b)



B

B<sub>1</sub>



## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – monokryštály čistých kovov

Šmykové napätie, pri ktorom sa posunú sklzové roviny → sklzové napätie → krivky spevnenia pre sklz „ $a$ “:

$$a = s/h$$

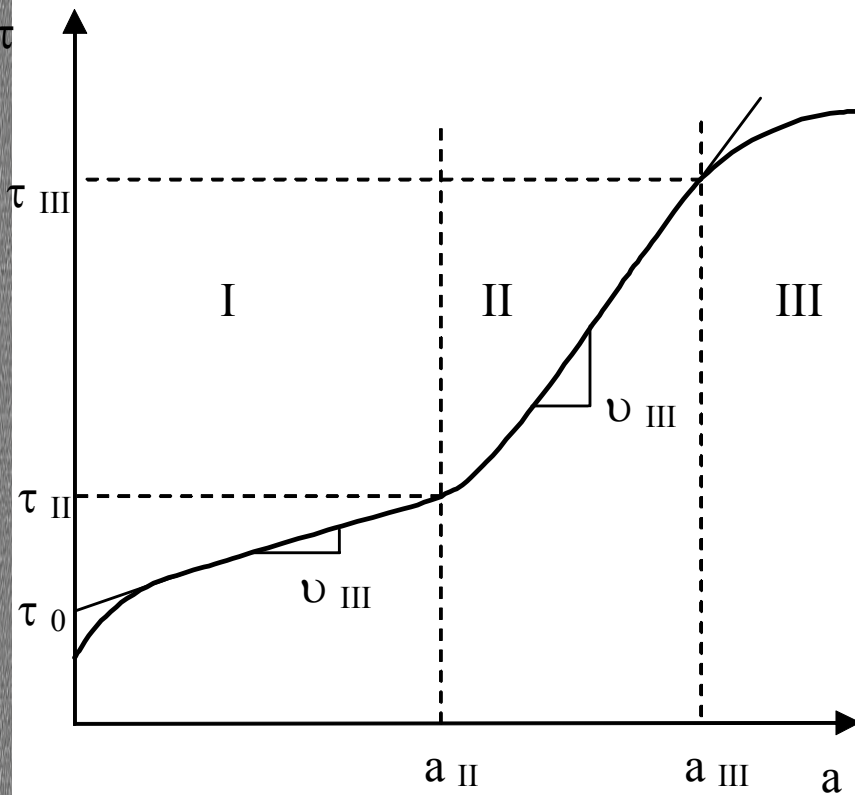
kde  $s$  = vzájomné posunutie 2 sklzových rovín s kolmou vzdialenosťou  $h$



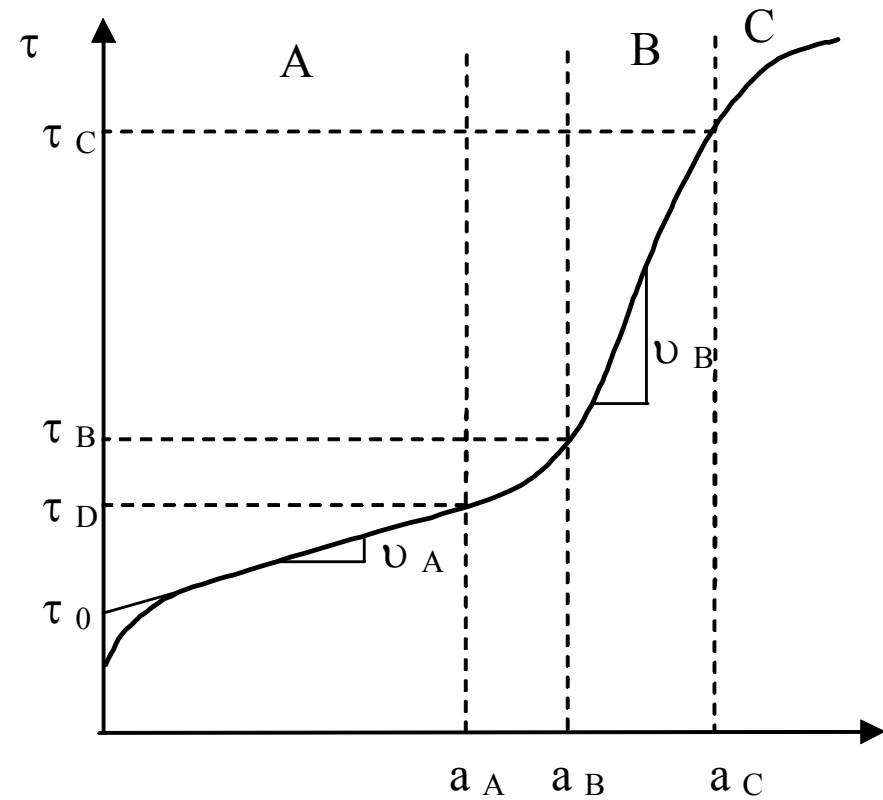
## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – monokryštály čistých kovov  
koeficient spevnenia:  $\vartheta = d\tau/da$

yhman.tnuni.sk



a)



b)



## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – monokryštály čistých kovov

### Oblasť I

- základná dislokačná štruktúra vytvorí napäťové pole ďalekého dosahu,
- dislokácie sa pohybujú (v hlavnom sklzovom systéme) len zriedka,
- ich stredná voľná dráha je veľmi dlhá,
- vznikajú prekážky pre pohyb dislokácií



## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – monokryštály čistých kovov

### Oblasť II

- stredná voľná dráha dislokácií sa začína skracovať,
- skracovanie dĺžky sklzových čiar



## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – monokryštály čistých kovov

### Oblasť III

- $\tau_{III}$  silne závisí na teplote a sklzovej rýchlosti,
- dochádza k priečnemu pohybu dislokácií (predĺženie strednej voľnej dráhy) → koeficient spevnenia  $\vartheta$  klesá





## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – monokryštály zliatin

Zliatina = cudzí atóm v mriežke základného motívu

Ovplyvnenie vlastností:

→ interakcia dislokácie s cudzím atómom

→ pohyb cudzích atómov v oblasti vysokých teplôt:

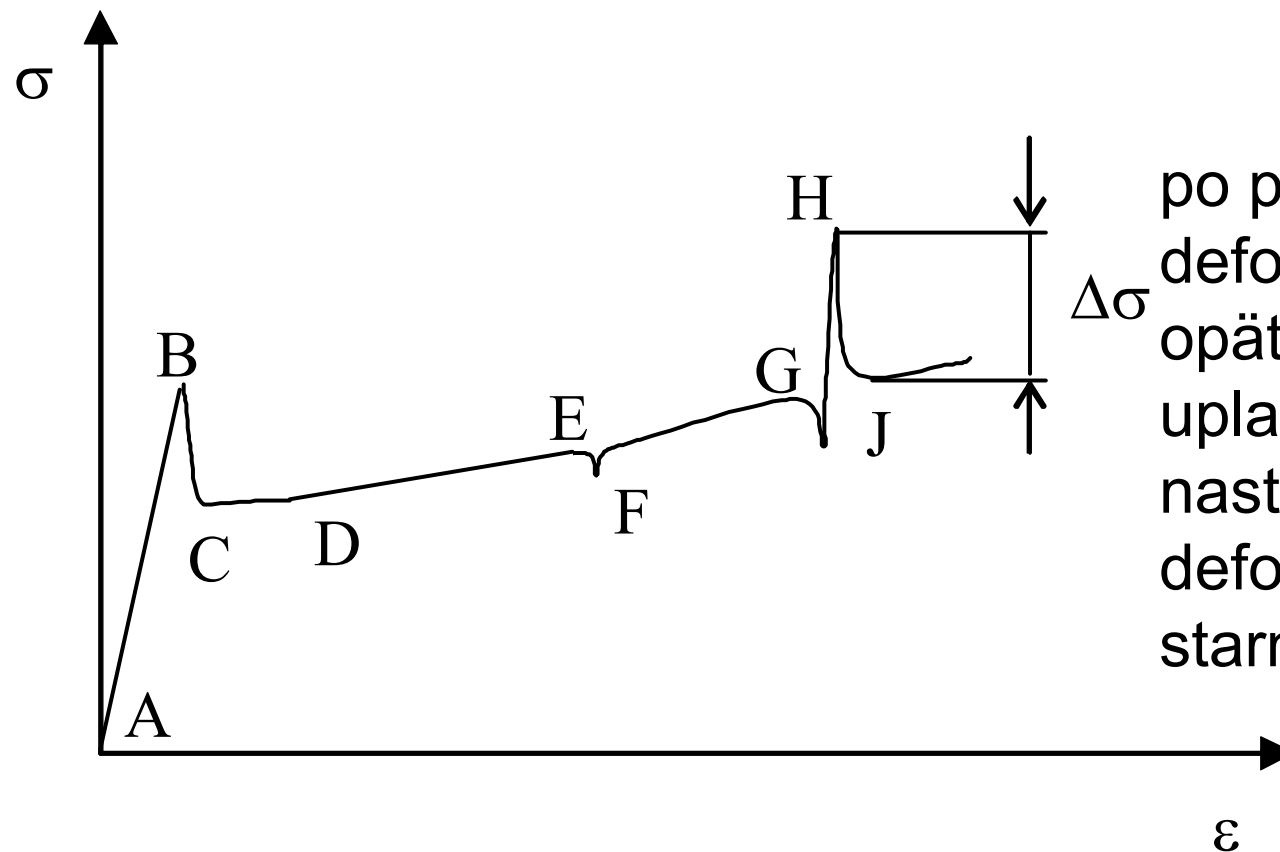
Ostrá medza sklzu

Portevin-LeChatelierov jav

## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – monokryštály zliatin

Ostrá medza sklzu ABC, GHJ

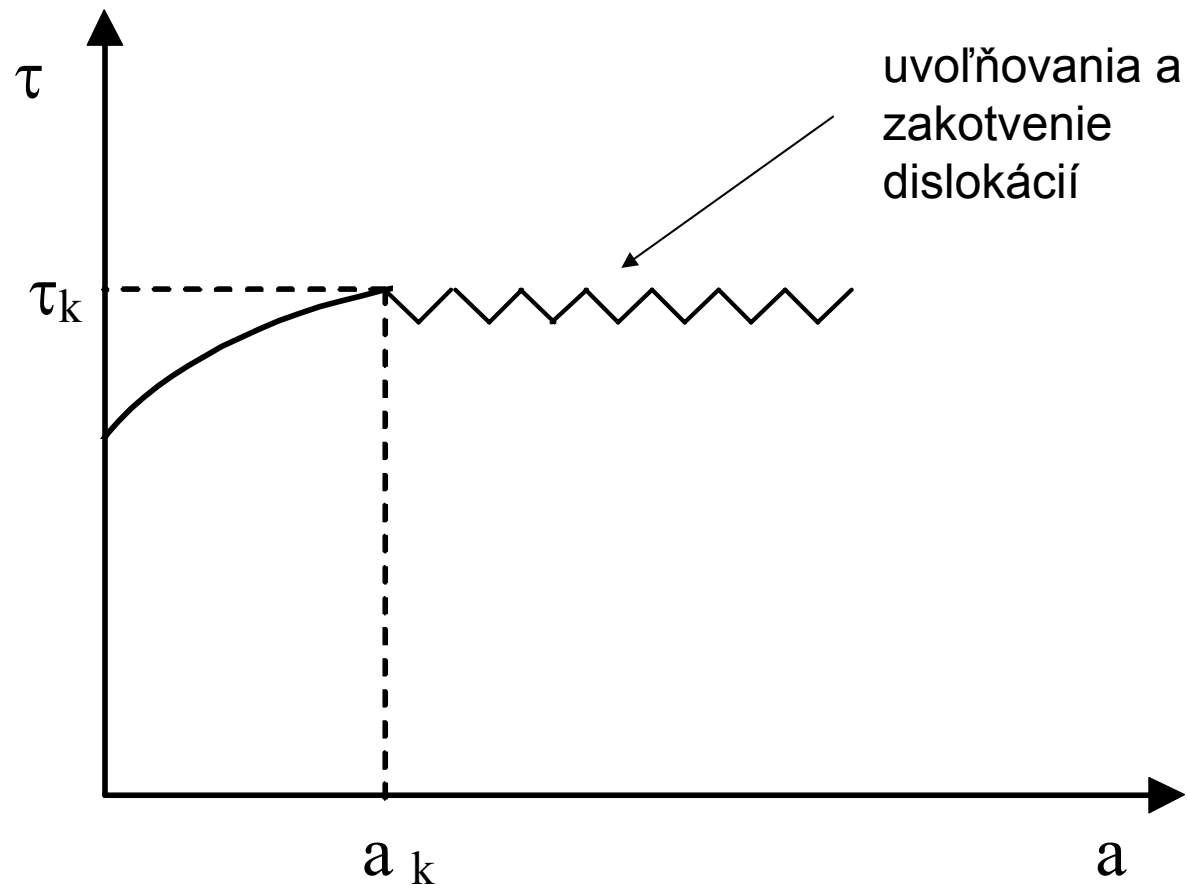


po prerušení  
deformácie a jej  
opätovnom  
uplatnení môže  
nastať GHJ –  
deformačné  
starnutie

## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – monokryštály zliatin

Portevin-LeChatelierov jav





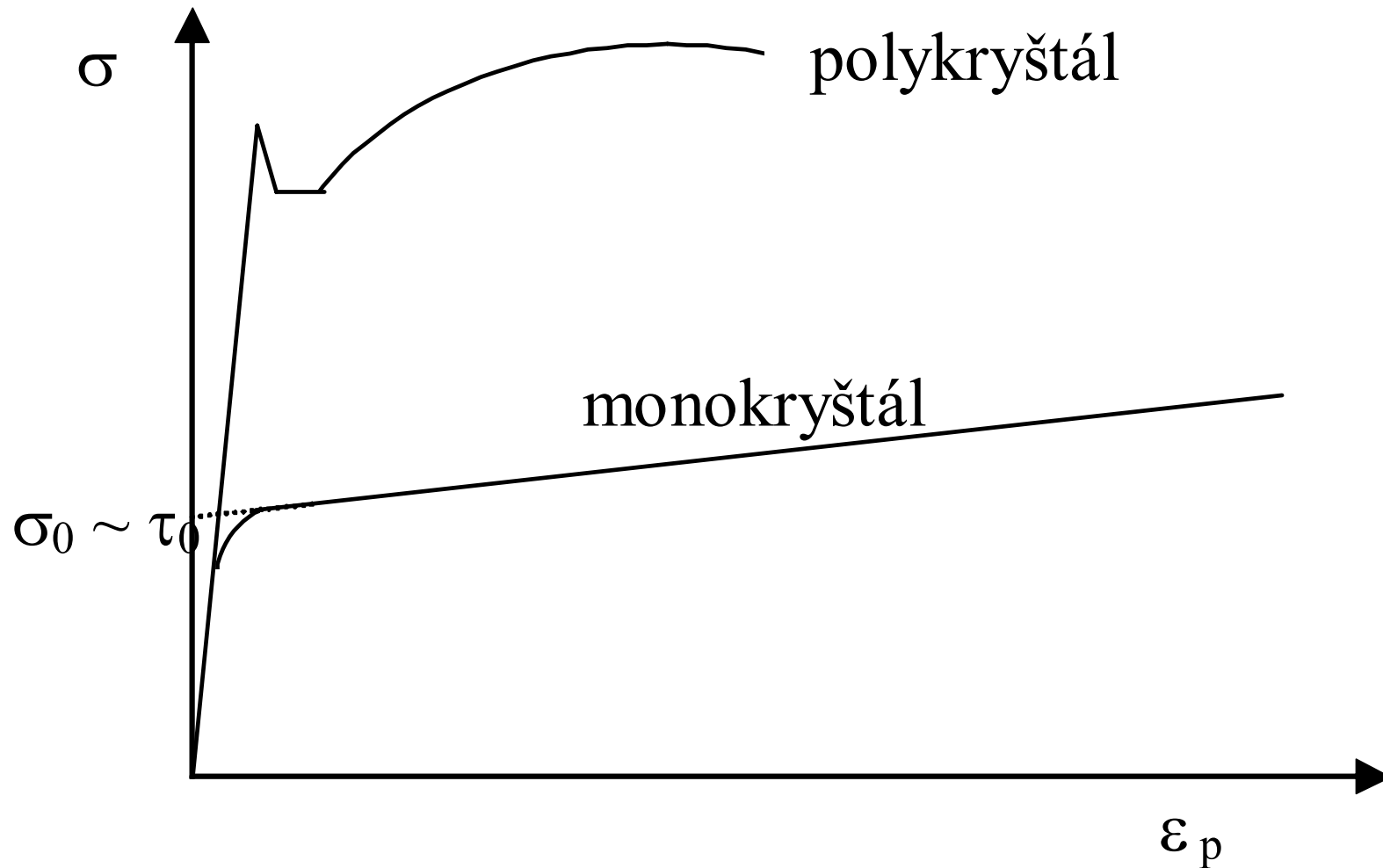
## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – polykryštály

Technická prax – takmer výlučne polykryštalické materiály, deformácia, na rozdiel od monokryštálov, nie je homogénna a začína spravidla pri vyššom napätí

## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – polykryštály



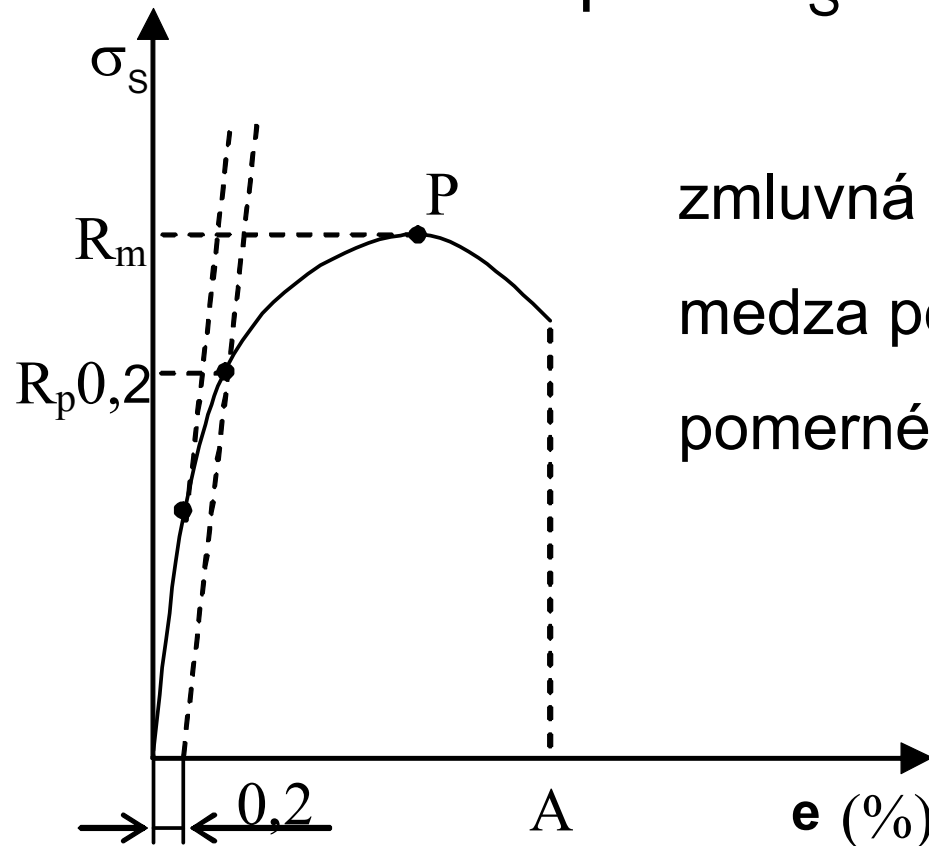


## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – polykryštály

Skúška ťahom o konštantnej deformačnej rýchlosti

→ závislosť napätia  $\sigma_s$  na pomernom predĺžení  $e$ :



zmluvná medza skazu v ťahu  $R_{p0,2}$

medza pevnosti v ťahu  $R_m = F_m/S_0$

pomerné trvalé predĺženie

$$A = (l_f - l_0)/l_0$$

$$\sigma_s \text{ (zmluvné napätie)} = F/S_0$$



## 4.2 Deformácie

- Deformačné spevnenie – polykryštály

Počas deformácie sa prierez mení:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \left( 1 + \frac{l - l_0}{l_0} \right) = \frac{F}{S_0} (1 + e)$$

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left( 1 + \frac{l - l_0}{l_0} \right) = \ln(1 + e)$$

## 4.3 Lomy

Zmena vonkajších zaťažení:

- Stabilný lom
- Nestabilný lom





## 4.3 Lomy

Základné typy lomových procesov:

- Tvárny lom
- Krehký lom
- Lom koróziou pod napätím
- Únavový lom
- Creepový lom (Lom tečením)



## 4.3 Lomy

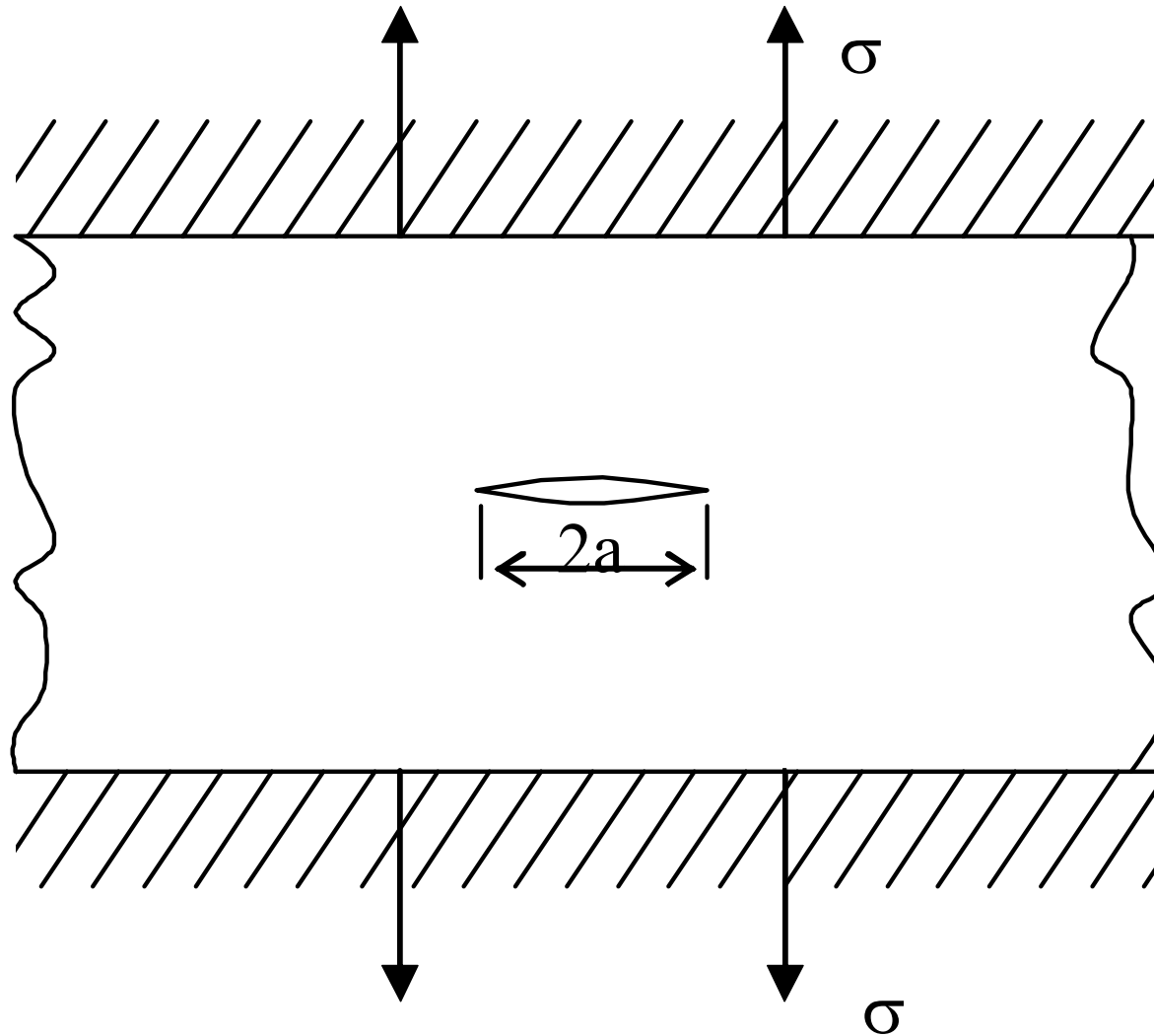
- Lomová mechanika – Griffithovo kritérium

Podmienka stability, založená na energetickej bilancii telesa

Príklad: nekonečne široká doska o jednotkovej hrúbke s centrálnou trhlinou, zaťažená homogénnym ťahovým napätím → ak proces šírenia je spojený s poklesom celkovej energie → trhlina sa bude nestabilne šíriť

## 4.3 Lomy

- Lomová mechanika – Griffithovo kritérium





## 4.3 Lomy

- Lomová mechanika – Griffithovo kritérium

Trhlina o dĺžke  $2a$  uvoľní elastickú energiu:

$$W_e = \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E}$$

Práca potrebná na vznik nových povrchov trhliny:

$$W_s = 4a\gamma_s$$

kde  $\gamma_s$  je merná povrchová energia materiálu





## 4.3 Lomy

- Lomová mechanika – Griffithovo kritérium

$$W = W_s - W_e$$

podmienka nestability:  $\frac{dW}{da} \leq 0$

$$\frac{d\left(4a\gamma_s - \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E}\right)}{da} \leq 0 \quad \rightarrow \quad 2\gamma_s - \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \leq 0$$



## 4.3 Lomy

- Lomová mechanika – Griffithovo kritérium

$$\sigma_c = 2\gamma_s \quad \text{odpor materiálu proti šíreniu trhliny}$$

$$a_c = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad \text{hnacia sila trhliny}$$



## 4.3 Lomy

- Lomová mechanika – Griffithovo kritérium

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}}$$

$$a_c = \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2}$$

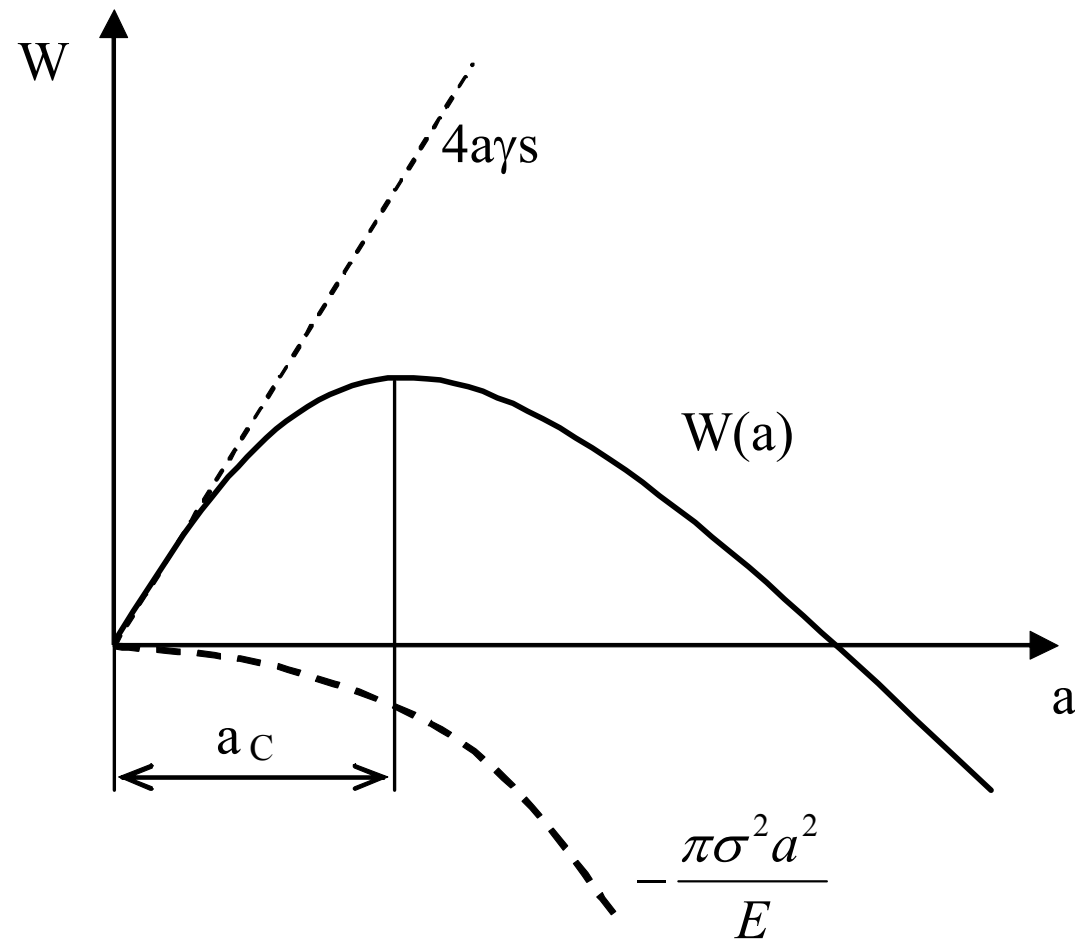
Treba ešte vziať do úvahy:

teleso má konečné rozmery

vzniká lokálna plastická deformácia (výmena en. medzi plast. a elast. deformáciou)

## 4.3 Lomy

- Lomová mechanika – Griffithovo kritérium





## 4.3 Lomy

- Lomová mechanika
- Griffithovo kritérium - nedostatky:
  - Neuvažuje sa s prácou vonkajších síl
  - Neuvažuje sa s tvarom telesa ani s tvarom trhliny
  - Neuvažuje sa s rozmiestnením vonkajších síl
- Iné koncepcie lomovej mechaniky:
  - Lineárna (Hookov zákon)
  - Elasticko-plastická



## 4.3 Lomy

- Štádiá lomových procesov
  - Plastická deformácia
  - Vznik mikroskopických porúch
  - Stabilný rast porúch
  - Náhly dolom (nestabilný rast trhliny)

Jednotlivé štádiá sa môžu prelínať, objavovať súčasne a pod.!





## 4.3 Lomy

- Štádiá lomových procesov - plastická deformácia
  - pohyb dislokácií
  - plastická deformácia v celom objeme alebo len lokálne
  - spevňovanie materiálu
  - vznik miestnych napäťových koncentrácií



## 4.3 Lomy

- Štádiá lomových procesov - vznik mikroskopických porúch
  - interakcie dislokácií
  - vznik nových mikropovrchov → uvoľňovanie lokálnych napätí



## 4.3 Lomy

- Štádiá lomových procesov - stabilný rast porúch
  - práca vonkajších síl
  - lokálne uvoľňovanie elastickej energie
  - účinky tepla
  - spájanie mikroporúch → vznik trhliny, ktorá ďalej rastie
  - ak práca vonkajších síl (+ nahromadená elastická energia) je dostatočne veľká na vytvorenie nových povrchov → je splnená jedna z podmienok pre nestabilné rozšírenie trhliny na celý prierez



## 4.3 Lomy

- Štádiá lomových procesov - náhly dolom
  - dôsledok splnenia podmienok nestability trhliny
  - teleso sa rozpadá na dve časti

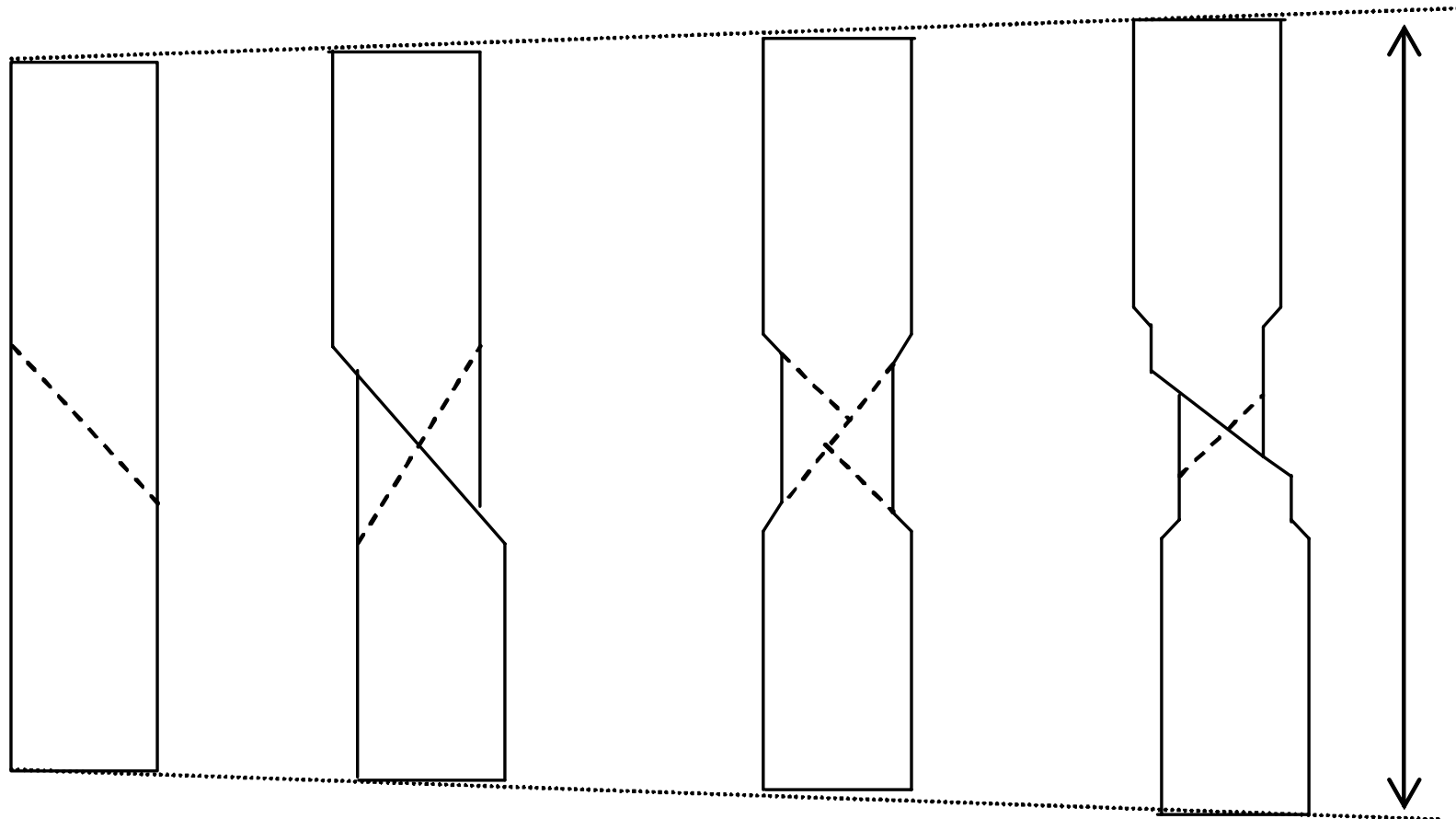


## 4.3 Lomy

- Tvárny lom
  - sklz po hraniciach zrn
  - z hľadiska bezpečnosti: nie je dôležitý
  - najčastejšie: skúška ťahom

## 4.3 Lomy

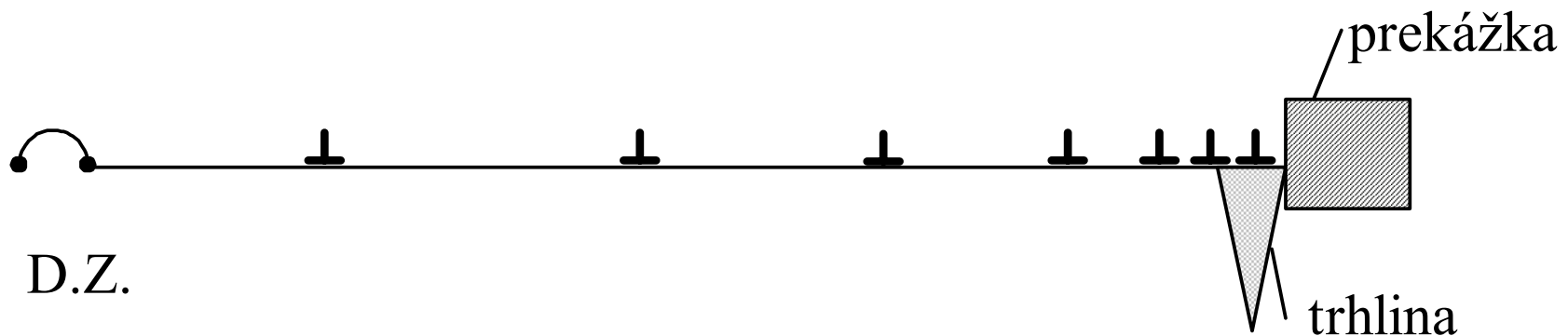
- Tvárny lom





## 4.3 Lomy

- Tvárny lom - vznik mikroporúch
  - zoskupenie dislokácií pred prekážkou (hranice zrn, cudzia častica a pod.) → koncentrácia napätí → uvoľňuje sa:
    - prenosom plastickej deformácie do oblasti za prekážku (plastická deformácia)
    - vznikom mikrotrhliny pozdĺž prekážky (tvárny lom)





## 4.3 Lomy

- Tvárny lom – rast dutín
  - v smere pôsobiaceho napätia
  - spojovanie dutín → (väčšie – menšie) jamky na lomových plochách

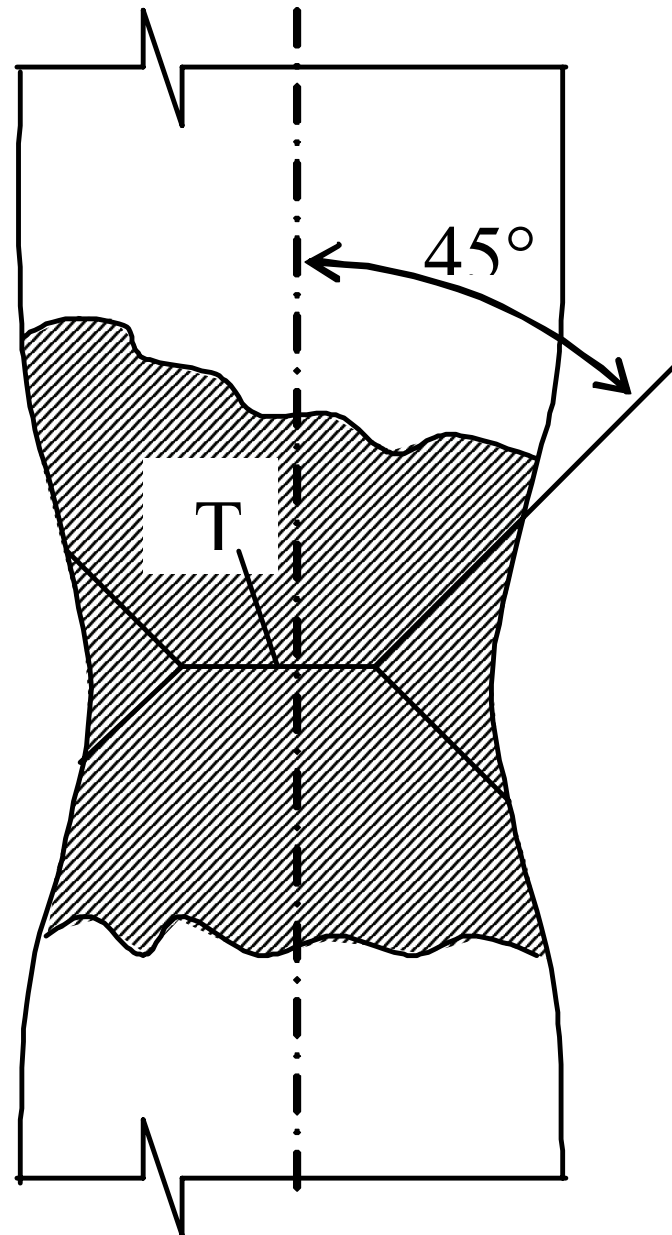


## 4.3 Lomy

- Tvárny lom – dolom
  - koncentrácia dutín v strede, ak dosiahne povrch → vzniknú podmienky pre odrezanie zostatku nosného prierezu. Dôjde k „urezaniu“ krajných častí telesa v rovine maximálneho šmykového napätia.

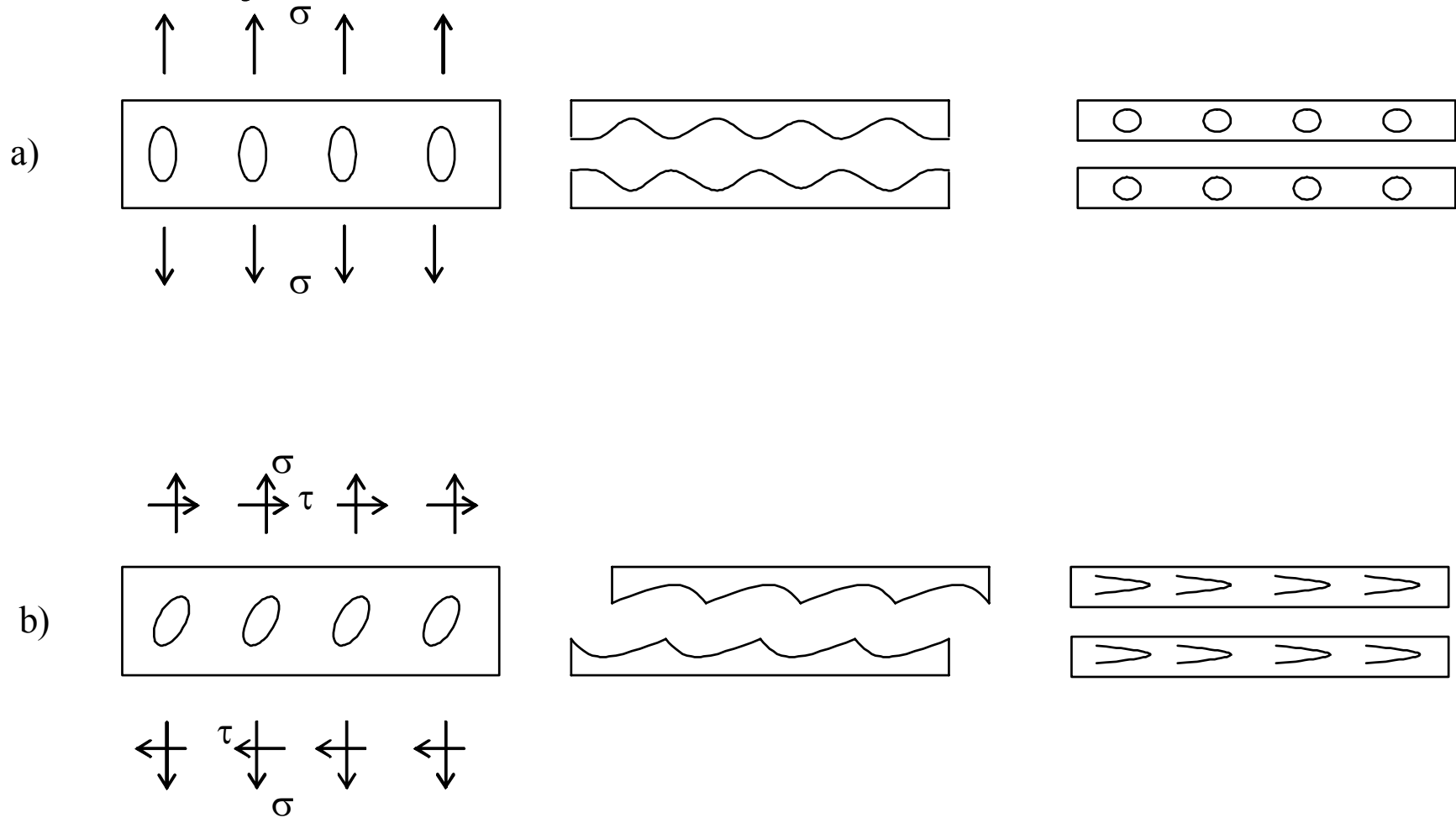
## 4.3 Lomy

- Tvárny lom – dolom

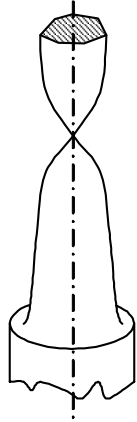
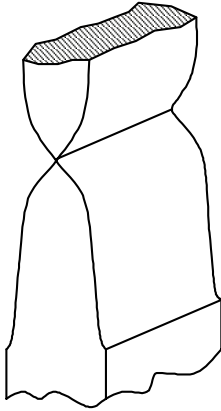
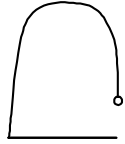
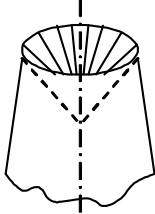
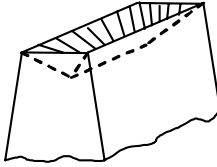
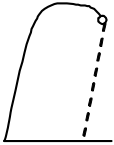
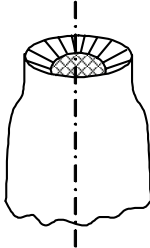
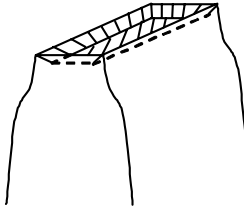
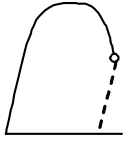


# 4.3 Lomy

- Tvárny lom – dolom



## 4.3 Lomy– Tvárny lom - Dolom

lom	tvar lomu		ťahový diagram
	kruhový prierez	štvorhranný prierez	
bodový			
šmykový			
zmiešaný			





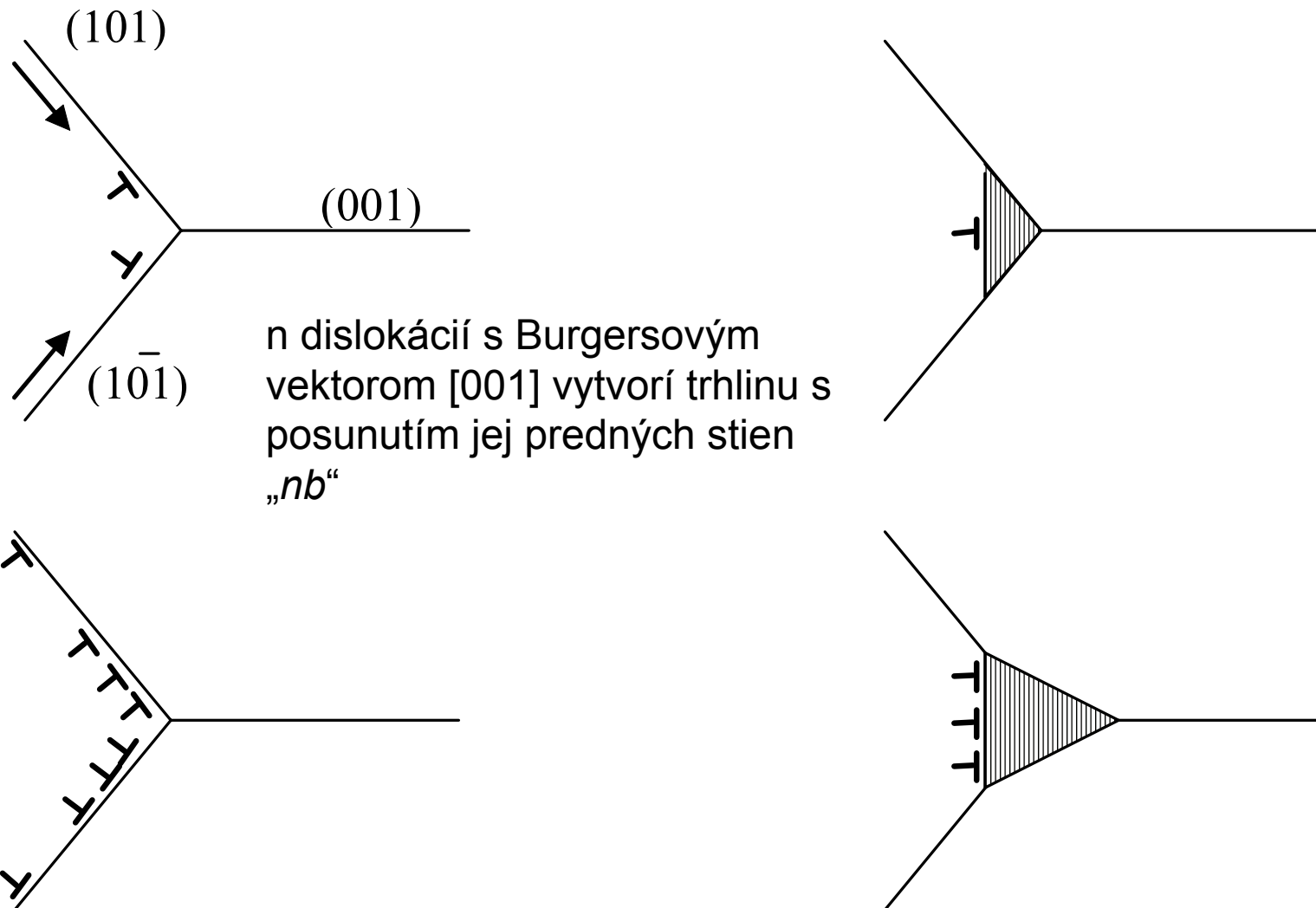


## 4.3 Lomy

- Krehký lom
  - bez väčšej plastickej deformácie
  - porušenie pozdĺž kryštalografických rovín → štiepenie (roviny obvykle najhustejšie obsadené atómami)
  - nízke teploty

## 4.3 Lomy

- Krehký lom – mechanizmus vzniku



## 4.3 Lomy

- Krehký lom

- Mikroskopické kritérium lomu: sila pôsobiaca na čele  $n$  dislokácií musí vykonať prácu, ktr. sa aspoň rovná povrchovej energii novovytvorených plôch:

$$\partial_c nb = 2\vartheta_s$$

↑  
odpor materiálu  
proti šíreniu trhliny

←  
merná povrchová  
energie materiálu



## 4.3 Lomy

- Krehký lom

- Lom bude tvárny ak:  $\partial_C n b < 2\vartheta_S$
- Lom bude krehký ak:  $\partial_C n b > 2\vartheta_S$

$\vartheta_S$  nezávisí na teplote,  
 $\sigma_C$ ,  $n$  sú tepelne závislé

Pri nízkych teplotách a vysokých deformačných rýchlostiach dochádza ku krehkému lomu. Hrubo-zrnné materiály sú viac náchylné na krehký lom (podľa priemernej veľkosti zrna)



## 4.3 Lomy

- Krehký lom – šírenie trhliny
  - vonkajšia hnacia sila → šírenie trhliny
  - predpoklady: trhliny v materiály vinou nedokonalejšej technológie (zvary, morenie, kalenie) alebo vinou prevádzky konštrukcie (korózia, únava)
  - štandardný znak: rovinná lomová plocha (nízka spotreba energie pri šírení lomu)



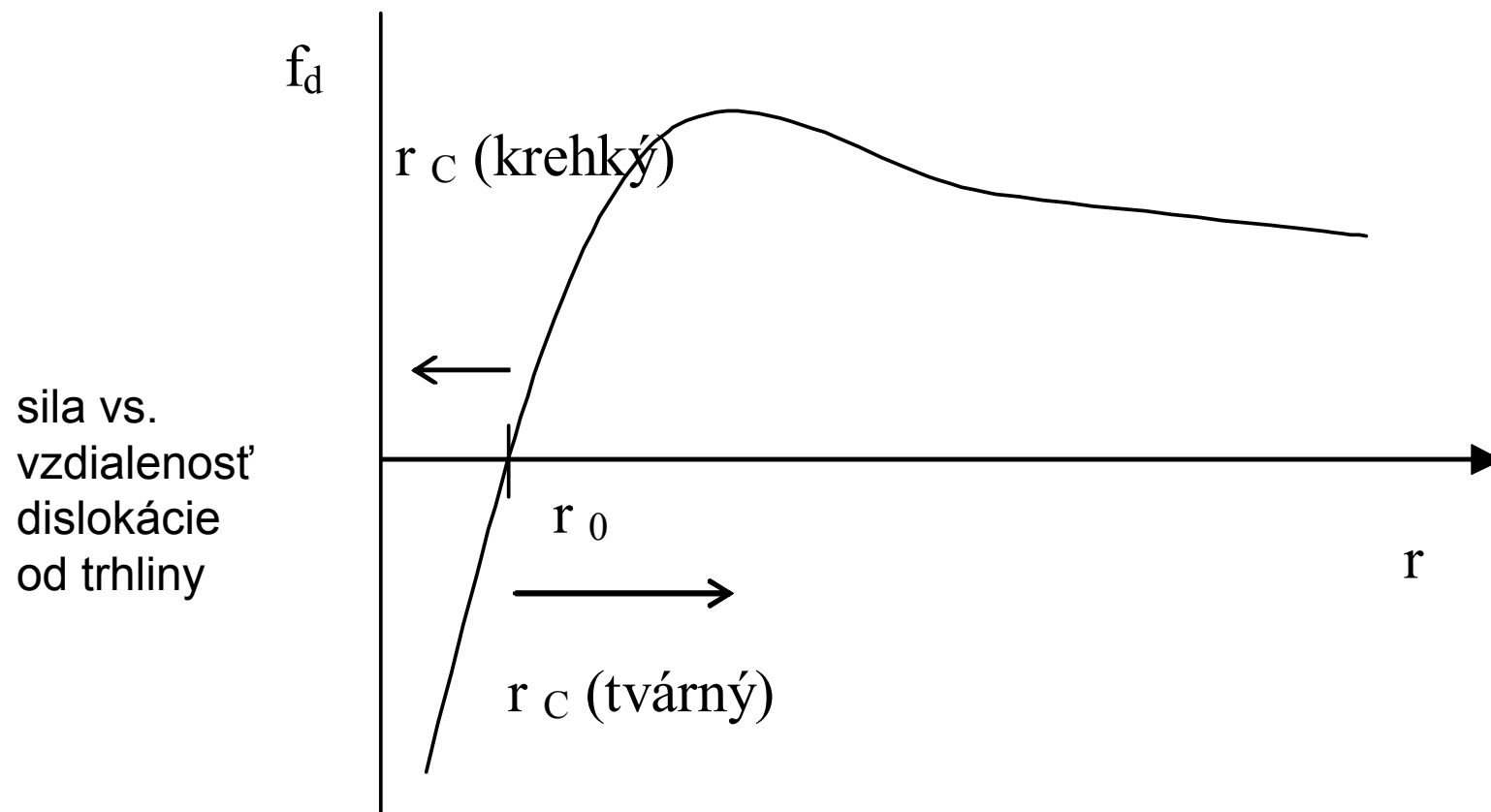
## 4.3 Lomy

- Krehký lom – lomová húževnatosť  
(odolnosť voči krehkému lomu)
  - je určená kritickou hodnotou hnacej sily v okamihu nestabilného lomu
  - meranie → komplikované
  - empirické (semiempirické) modely (vplyv štruktúry a pod.) → platia len v špeciálnych prípadoch



## 4.3 Lomy

- Krehký lom – krehkosť a tvárnosť ideálnych kryštálov  
teoretické koncepcie (Kelly, Tyson, Cottrell – KTC; Rice,  
Thompson – RT)



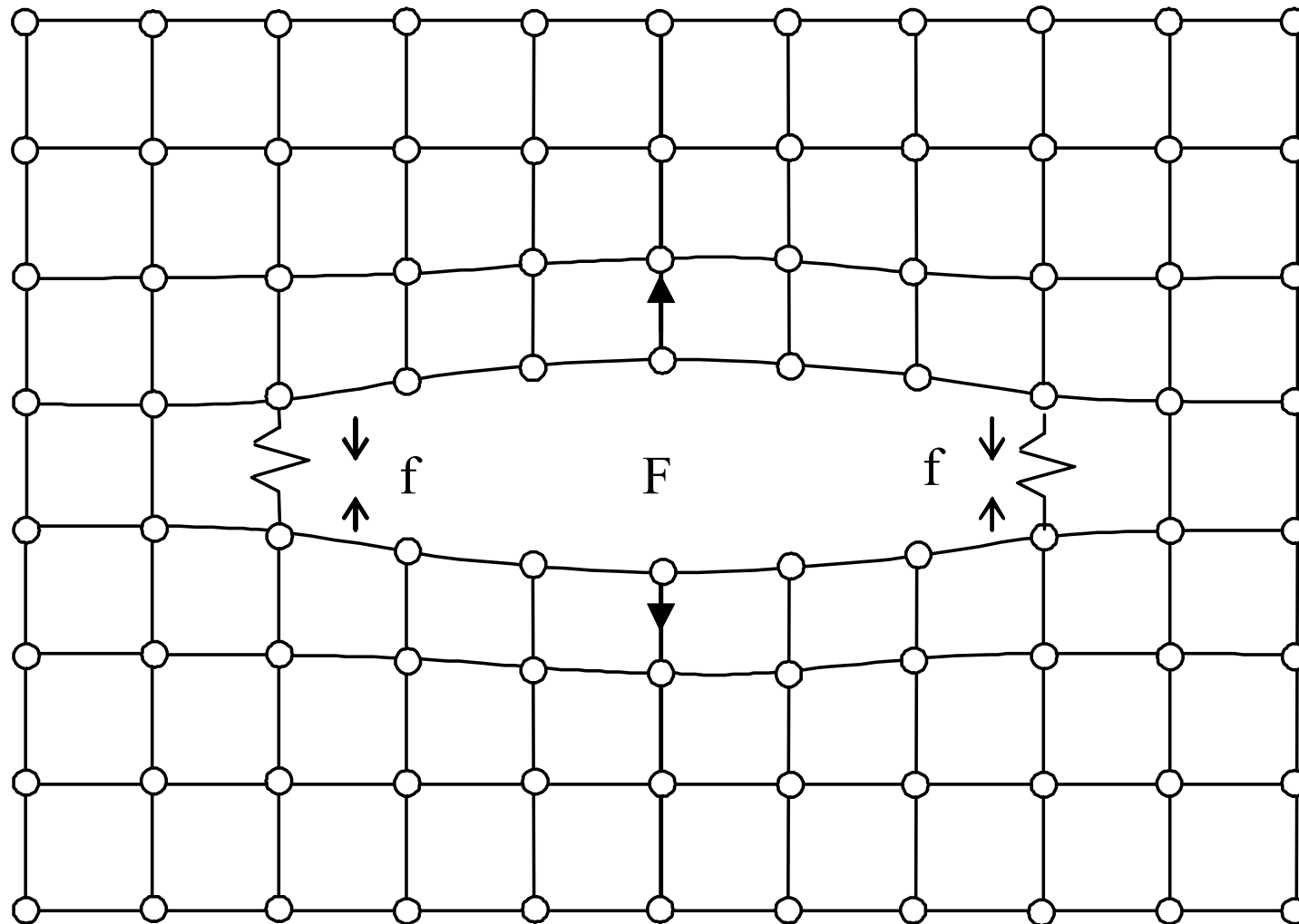


## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím
  - poškodzovanie (poškodzovacie procesy) je možné urýchliť vplyvom vonkajšieho prostredia.
  - korózia → jeden z najvýznamnejších degradačných mechanizmov
  - korózia → chemická (elektrochemická) reakcia medzi prostredím a materiálom
  - dôležité: príspevok korózie k porušovaniu väzieb na špici trhliny

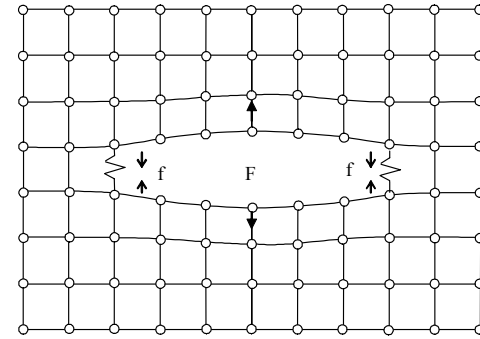
## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím



## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím



- trhlina → porušenie konečného počtu  $2N$  väzieb

$$\vec{u}_i = \sum_j G_{ij} \vec{F}_j$$

$\vec{u}_i$     premiestnenie  $i$  – teho bodu

$G_{ij}$     symetrický Greenov tenzor (funkcia  $N$ )

$\vec{F}_j$     vonkajšie sily



## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím

$F_0$  vonkajšia sila pôsobiaca na 2 atómy v centre trhliny  
 $f$  väzobné sily medzi atómami na čelách

- pre  $N \gg 1$  platí pre premiestnenie v centre a na čelách:

$$u_0 = G_{00}F_0 - 2G_{0N}f_N$$

$$u_N = G_{N0}F_0 - 2G_{NN}f_N$$

- koeficienty  $G$  sú pre danú dĺžku trhliny konštantné



## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím  
ak zanedbáme  $f_N$ :

$$u_0 = G_{00}F_0$$

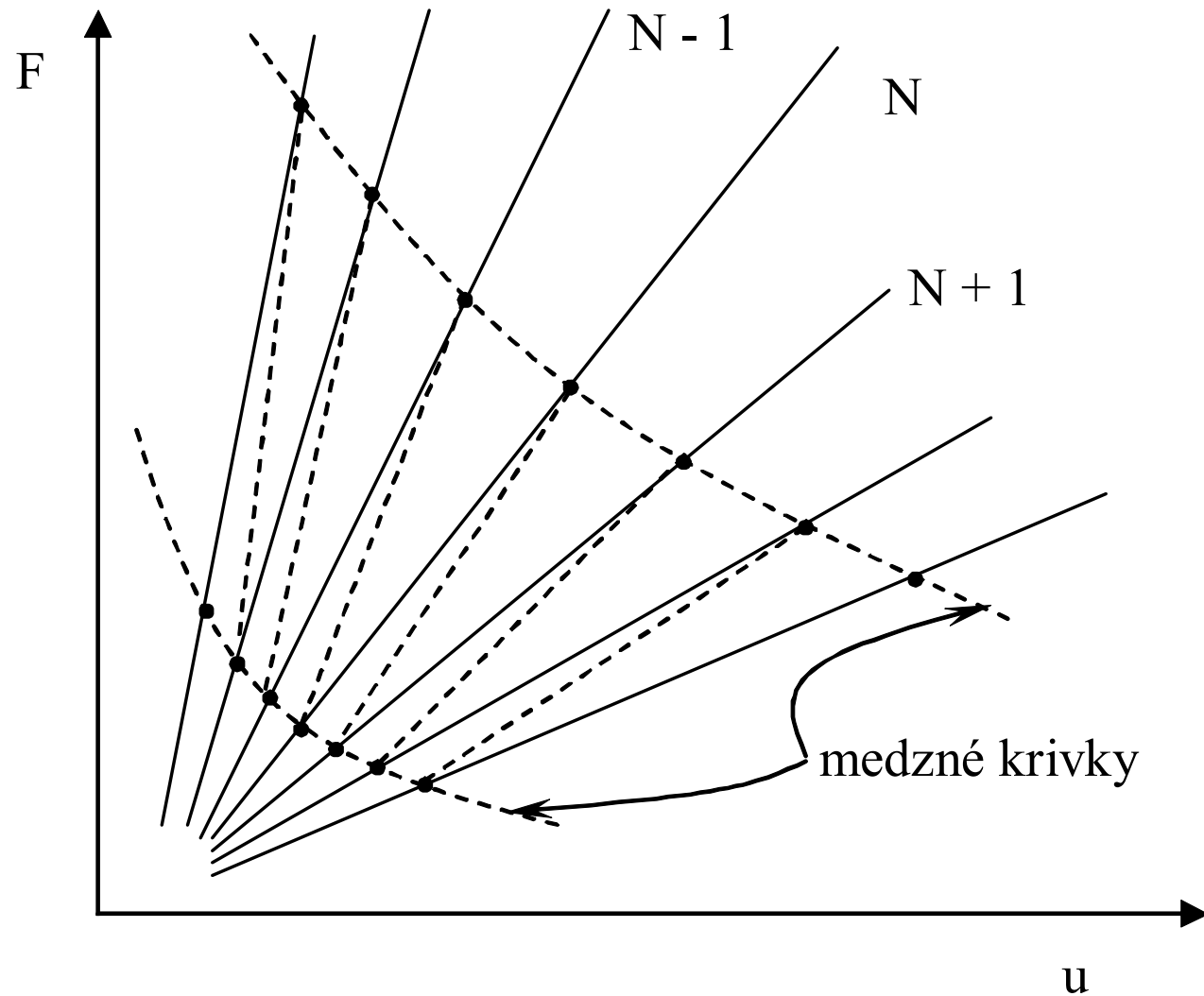
premiestnenie je ako funkcia  $F_0$  priamka so smernicou  $G_{00}$  (poddajnosť)

$G_{00}$  je funkciou  $N \rightarrow$  sústava priamok



## 4.3 Lomy

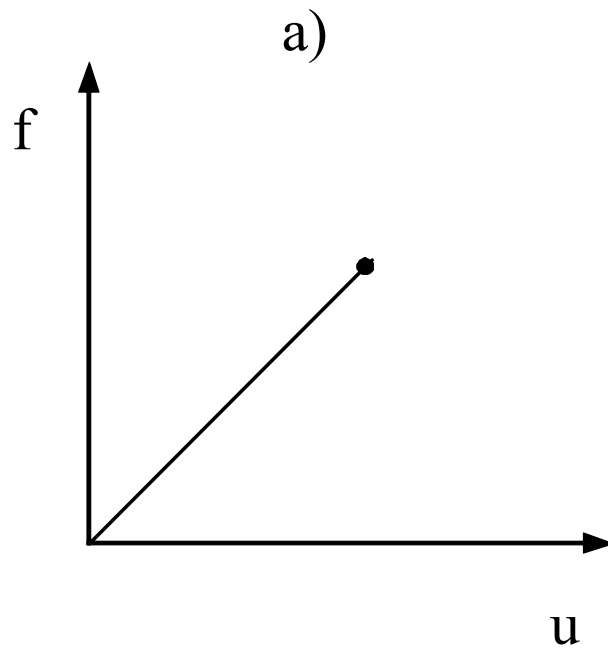
- Lom koróziou pod napätím



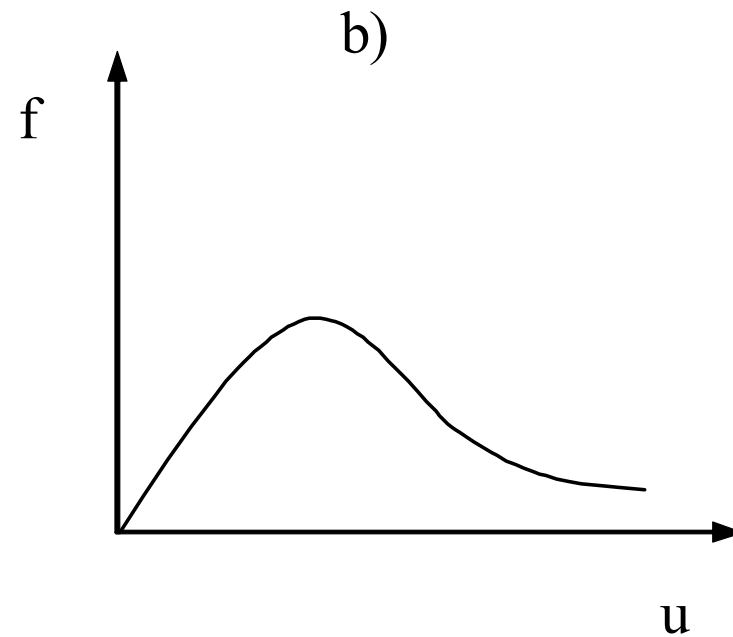
## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím

doteraz:

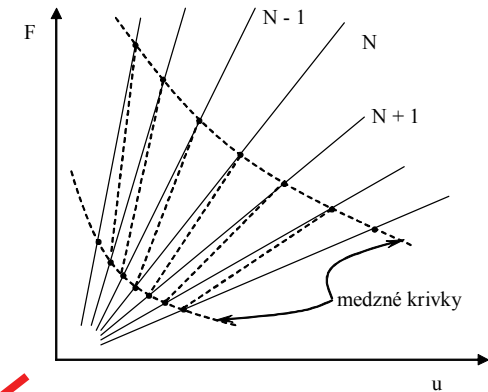
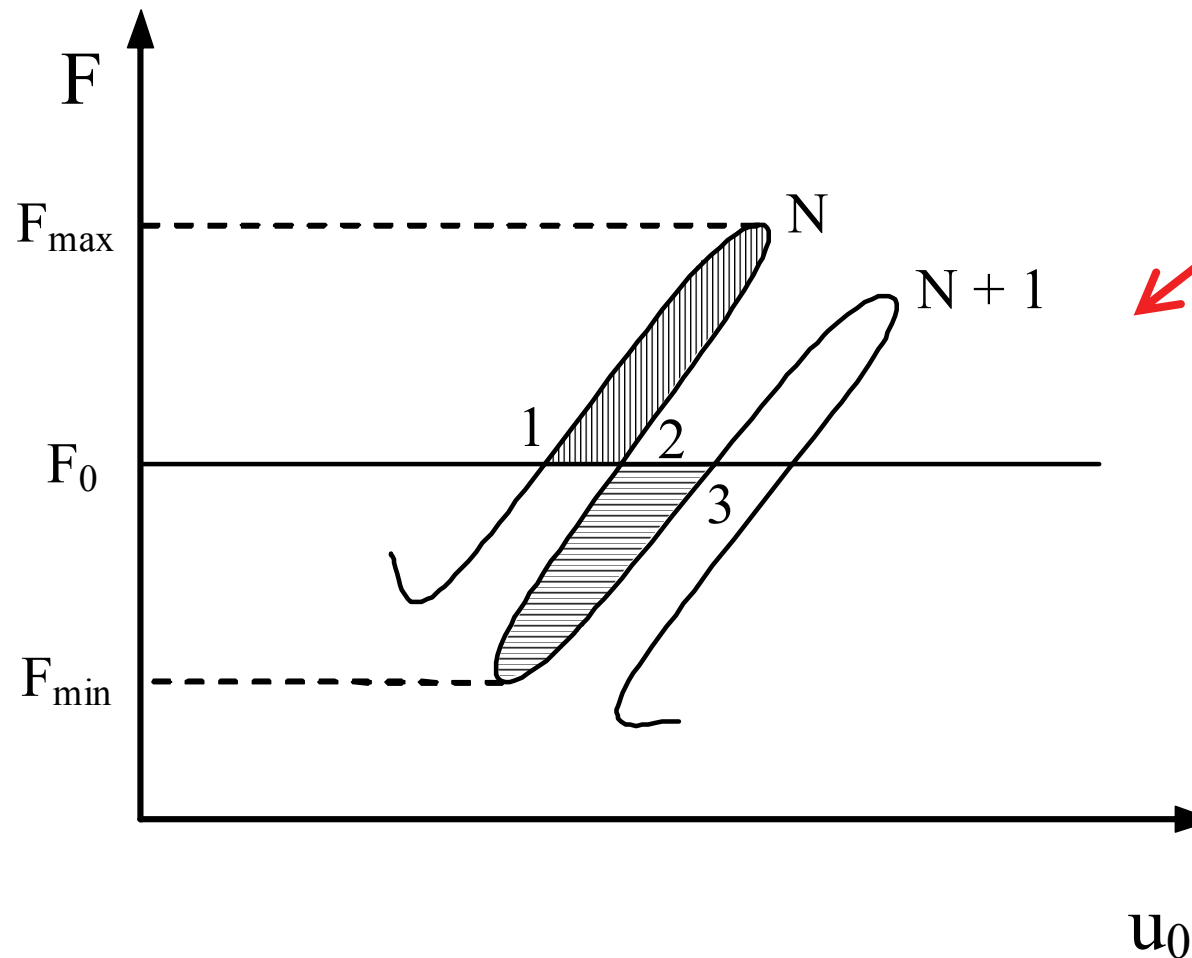


odteraz: nelineárne väzobné sily na čele trhliny



## 4.3 Lomy

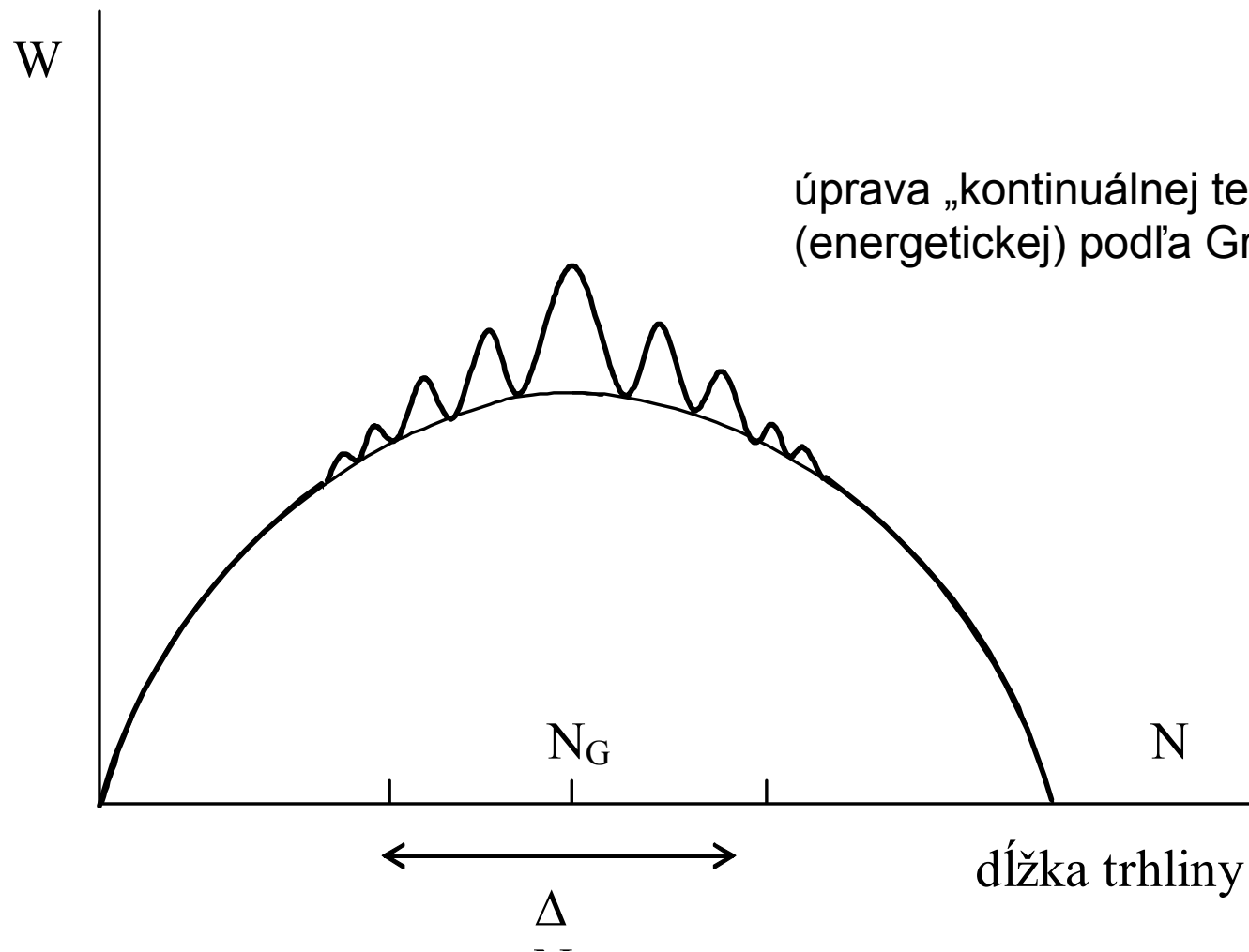
- Lom koróziou pod napätím



na rozdiel od Griffitha  
existuje viac stabilných  
bodov pri danej sile  
(dekompozičný teorém)

## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím



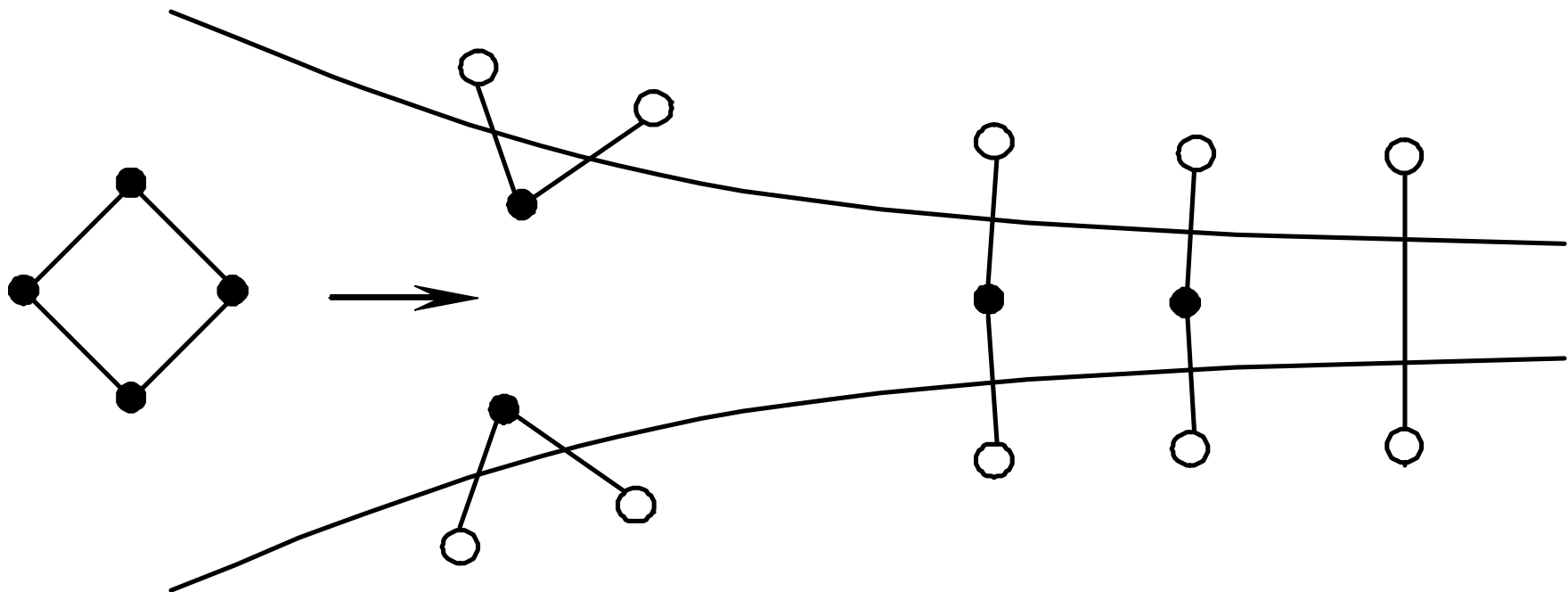


## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím
- Ako reakcie s externými chemickými látkami modifikujú uvedené obecné riešenie?

## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím
- Atómy vonkajšieho prostredia sú schopné vytvárať spojovacie mostíky medzi porušenými mriežkovými väzbami na špici trhliny:





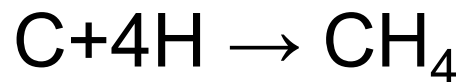


## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím - **Vodík**

Vodík (malá atómová veľkosť) → ľahko preniká do objemu kovu. Vnútri sa opäť zlučuje do H<sub>2</sub>, vytvára vysoké lokálne teploty a tlaky → vodíkové praskanie.

Pod vplyvom technológie výroby (morenie v kyselinovom kúpeli) reaguje s uhlíkom a vytvára *metán*:



Metán vytvára vnútorné napätia → vodíková korózia



## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím - charakteristiky
- Ak je teleso zaťažené ťahom v koróznom prostredí → vzniknú v ňom po čase transkryštalické alebo interkryštalické trhliny, ktr. po rozšírení na kritickú veľkosť spôsobia lom koróziou pod napätím. V prípade existencie vnútorných napätí k tomu môže dôjsť aj bez pôsobenia vonkajších síl



## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím – charakteristiky
- $K_I$  – súčiniteľ intenzity napätia ~ lomová húževnatosť
- Existuje minimálna (prahová) hranica  $K_{ISCC}$
- Hodnoty  $K \rightarrow$  funkcie prostredia
- Charakteristiky LKpN  $\rightarrow$  ovplyvnené typom prostredia a teplotou



## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím – Aktuálne problémy:
- vplyv radiačného (neutrónového) žiarenia → pokles charakteristík húževnatosti



## 4.3 Lomy

- Lom koróziou pod napätím
- Stabilné šírenie trhliny v koróznom prostredí pripomína stabilné šírenie trhliny v inertnom prostredí → LKpN sa niekedy nazýva aj statickou únavou



## 4.3 Lomy

- Únavový lom
  - V praxi → 80% prípadov lomov
  - Premennivé vonkajšie sily → môže dôjsť k lomu aj pri nižšej maximálnej hladine napätí ako je medza sklzu (proces postupného poškodzovania materiálu – únava materiálu)
  - Prvé pokusy: August Wöhler v r. 1852-1870 (praskanie osí železničných vagónov a parných strojov) → Wöhlerova krivka (záv. počtu cyklov do lomu  $N$  na amplitúde napätia  $\sigma_a$ )



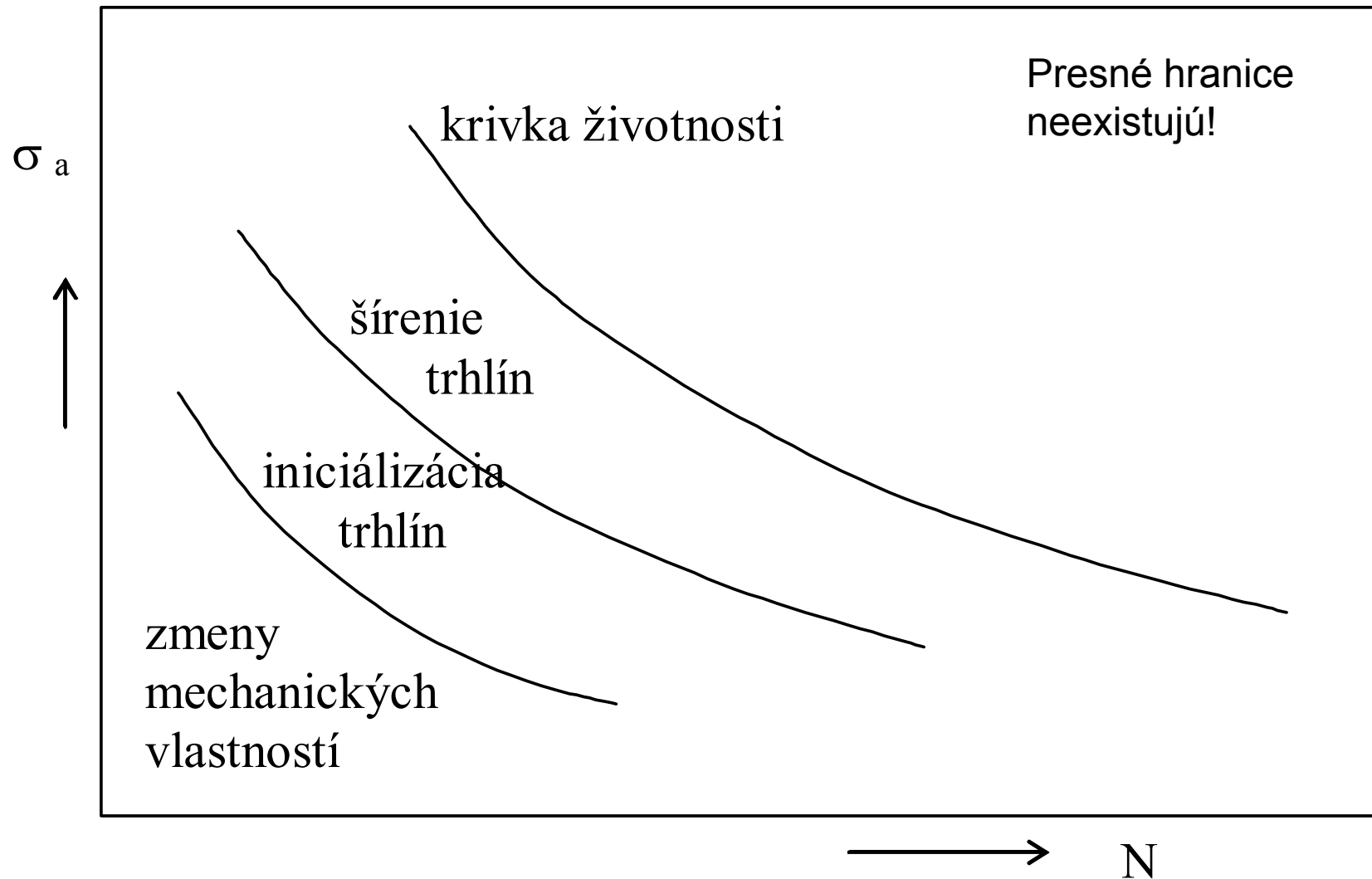


## 4.3 Lomy

- Únavový lom
  - Hranica:  $10^7$  cyklov pri harmonickom zaťažení → medza únavy  $\sigma_c$

## 4.3 Lomy

- Únavový lom



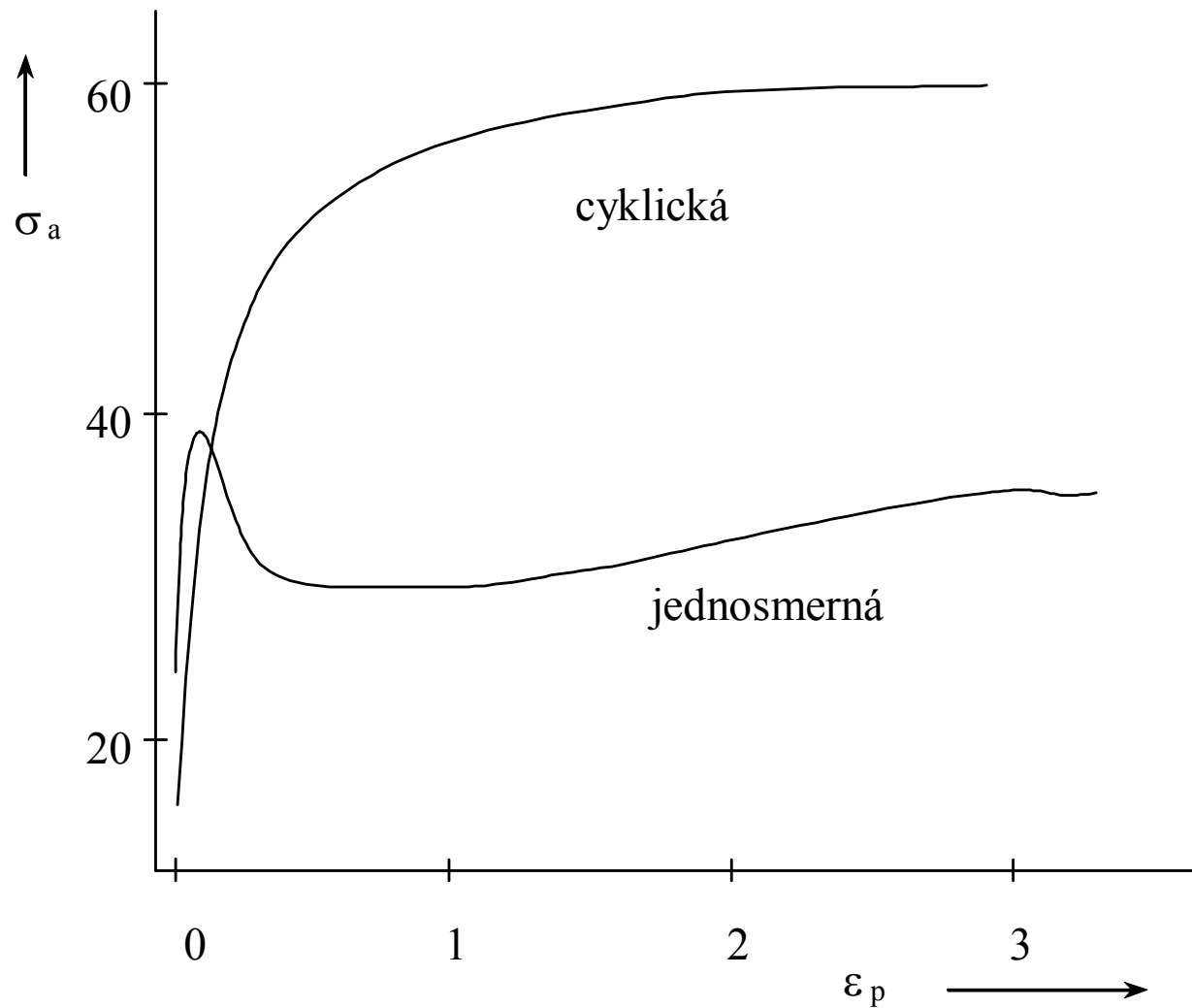


## 4.3 Lomy

- Únavový lom - odozva na cyklické zaťaženie
  - 1. Odpor materiálu rastie → cyklické spevňovanie
    - Typické: materiály žíhané
  - 2. Odpor materiálu klesá → cyklické zmäkčovanie
    - Typické: materiály spevnené
  - 3. Superpozícia 1. + 2. → zmena charakteru odozvy
    - Typické: materiály so špeciálnym typom mriežky (b.c.c.) s intersticiálnymi atómami

## 4.3 Lomy

- Únavový lom





## 4.3 Lomy

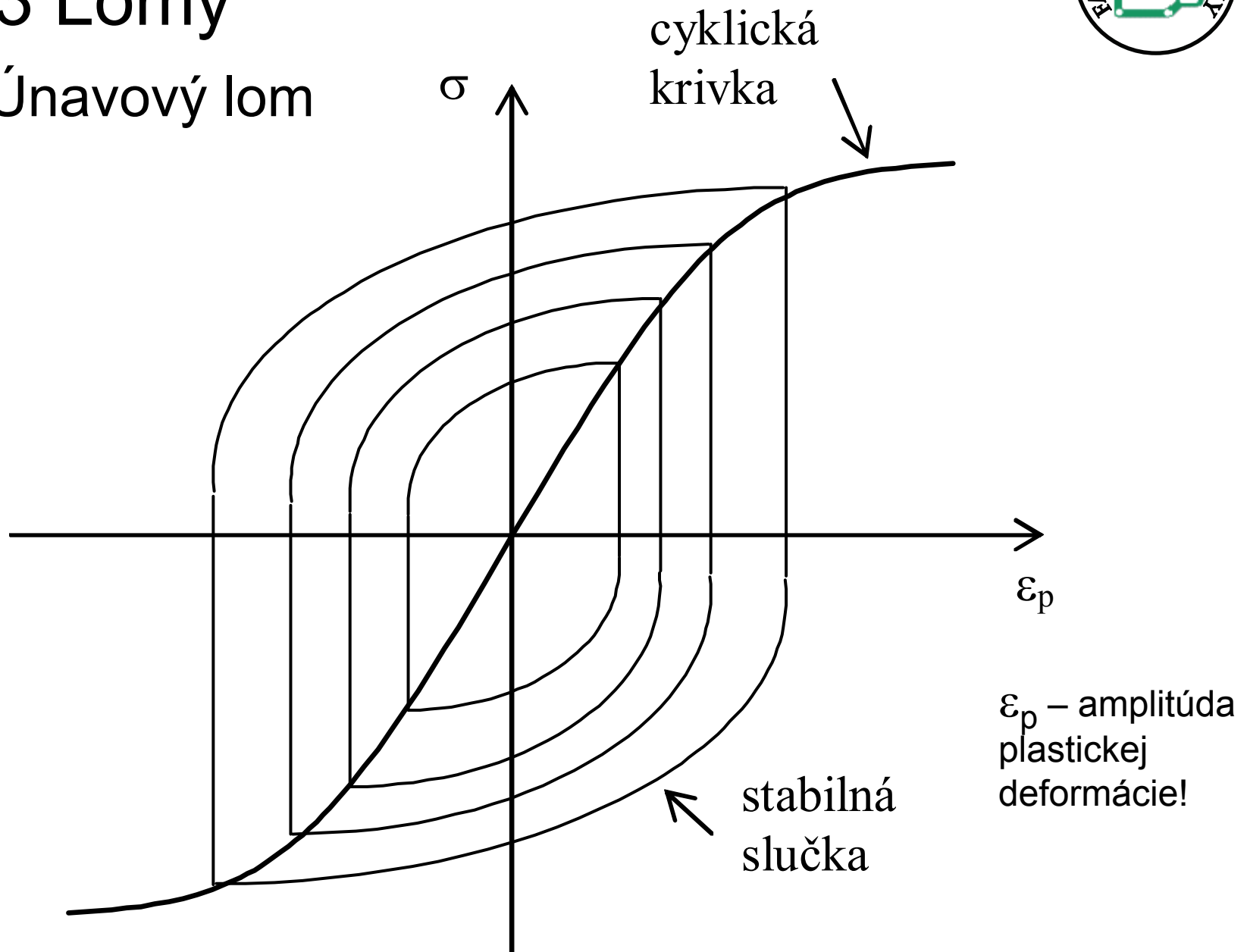
- Únavový lom

Saturovaná napäťovo-deformačná odozva (cyklická krivka napätia vs. deformácie)

[saturácia = zmeny, resp. intenzita zmien v čase klesá → saturačný charakter]

## 4.3 Lomy

- Únavový lom





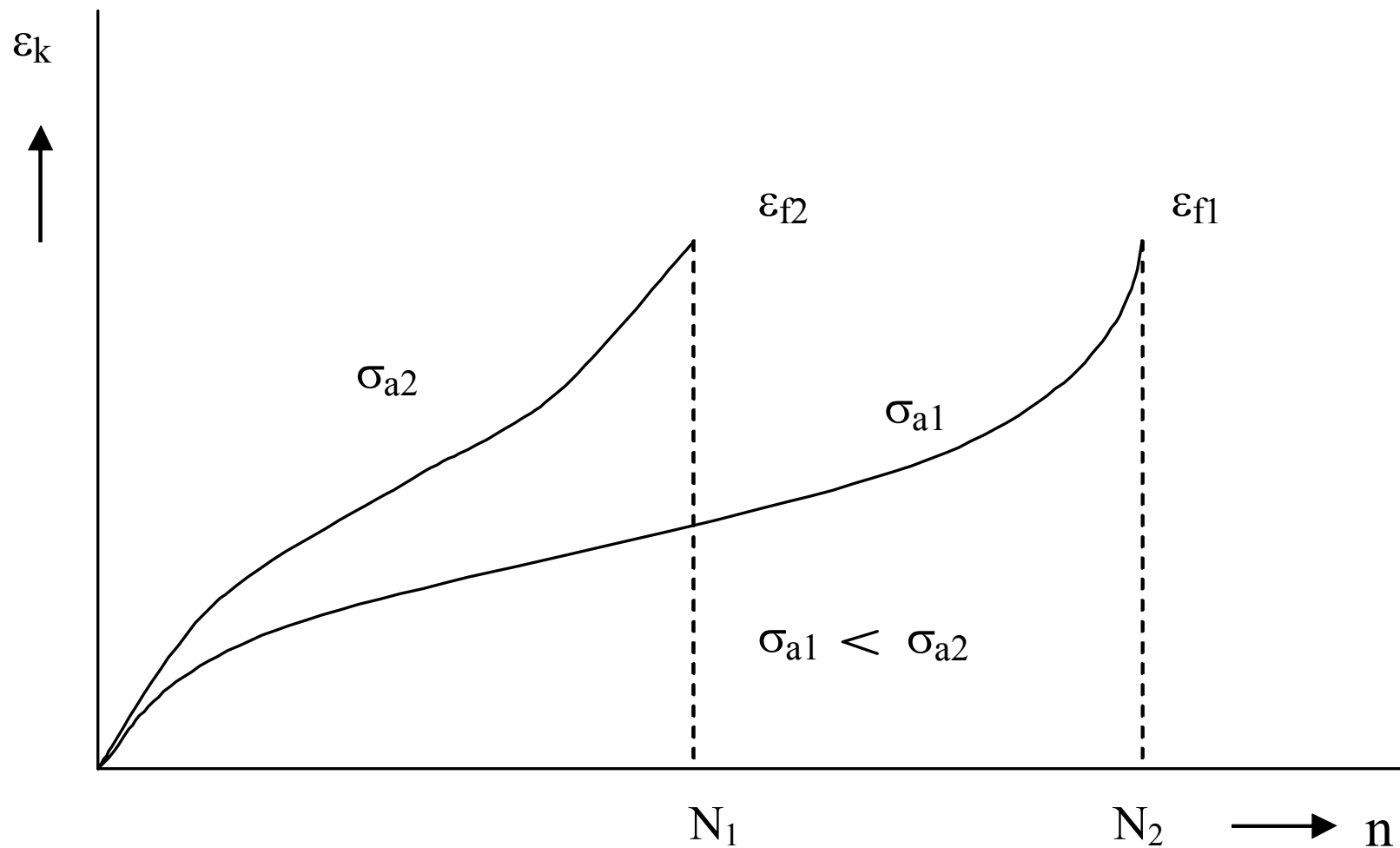


## 4.3 Lomy

- Únavový lom – charakteristiky únavovej životnosti
- Wöhlerova krivka (počet cyklov do lomu vs. amplitúda napätia)
- Manson-Coffinova krivka (amplitúda plastickej deformácie vs. počet cyklov do lomu)
- ...

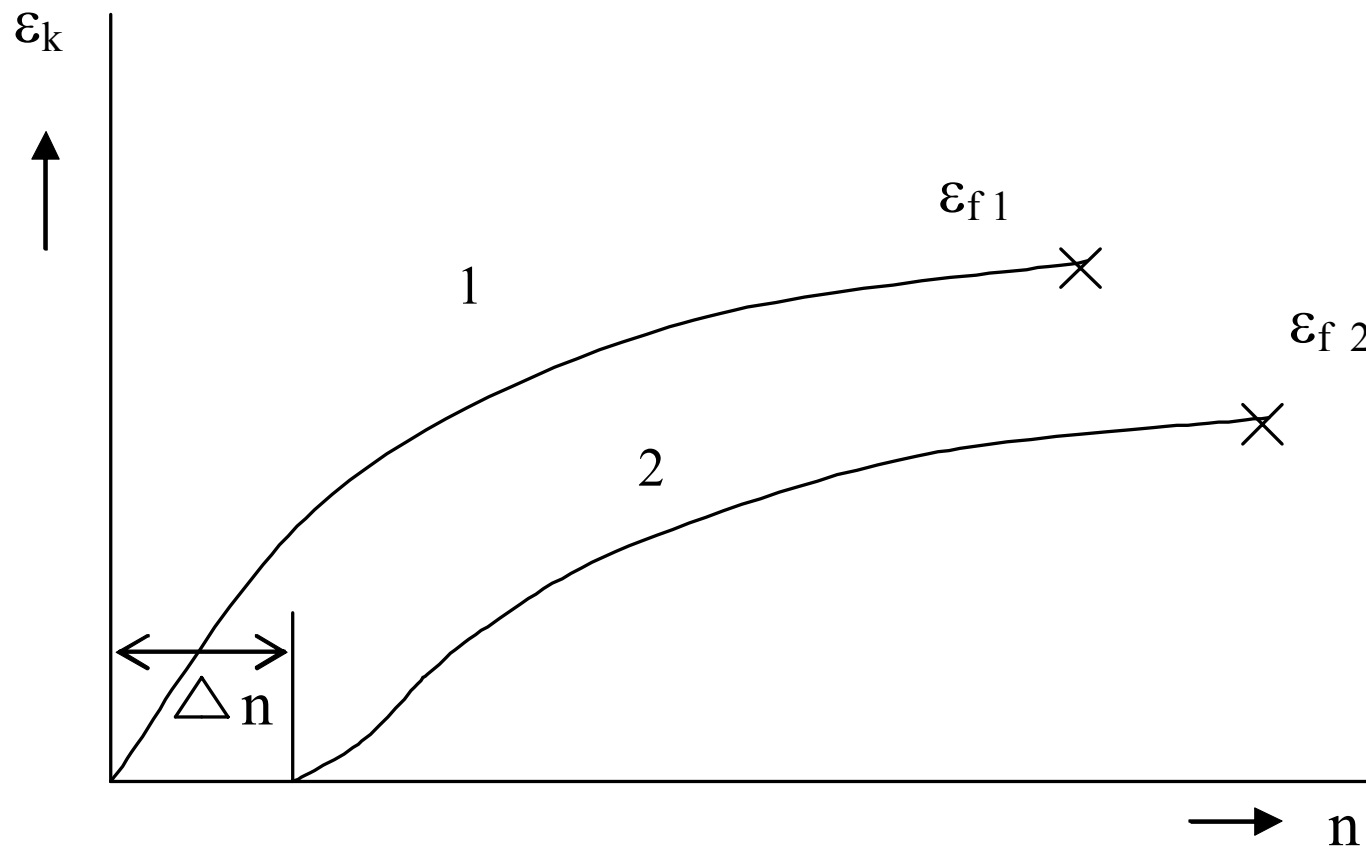
## 4.3 Lomy

- Únavový lom – charakteristiky únavovej životnosti



## 4.3 Lomy

- Únavový lom – charakteristiky únavovej životnosti





## 4.3 Lomy

- Únavový lom – Životnosť telesa

Životnosť telesa s existujúcimi trhlinami (zbytková životnosť) → počet cyklov do lomu  $N'$

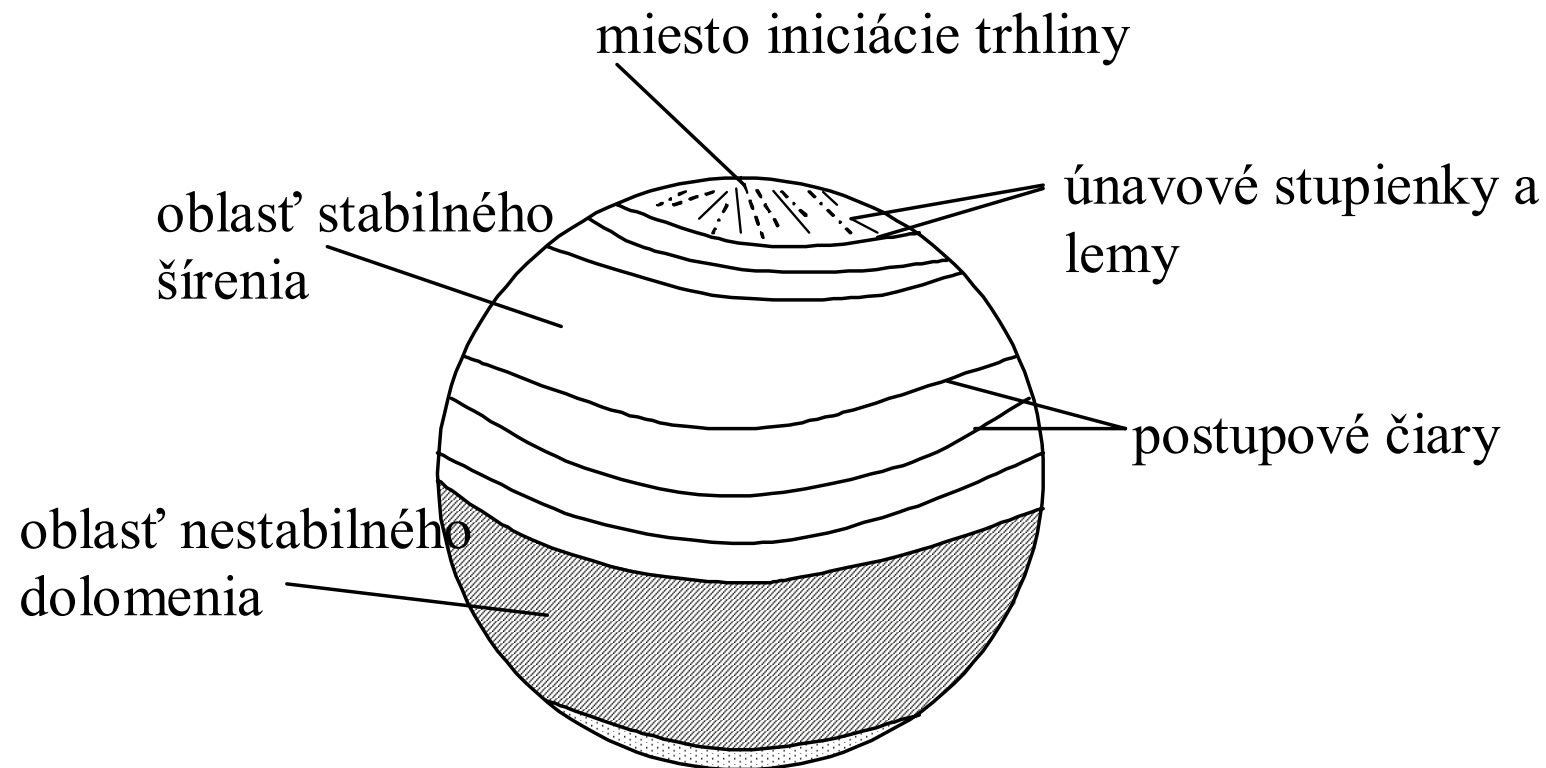
$$N' = \frac{1}{A} \int_{a_p}^{a_k} \frac{1}{K_a^\alpha} dl$$

$a_p$  – počiatočná dĺžka

$a_k$  – kritická dĺžka v okamihu nestabilného lomu

## 4.3 Lomy

- Únavový lom – Lomové plochy





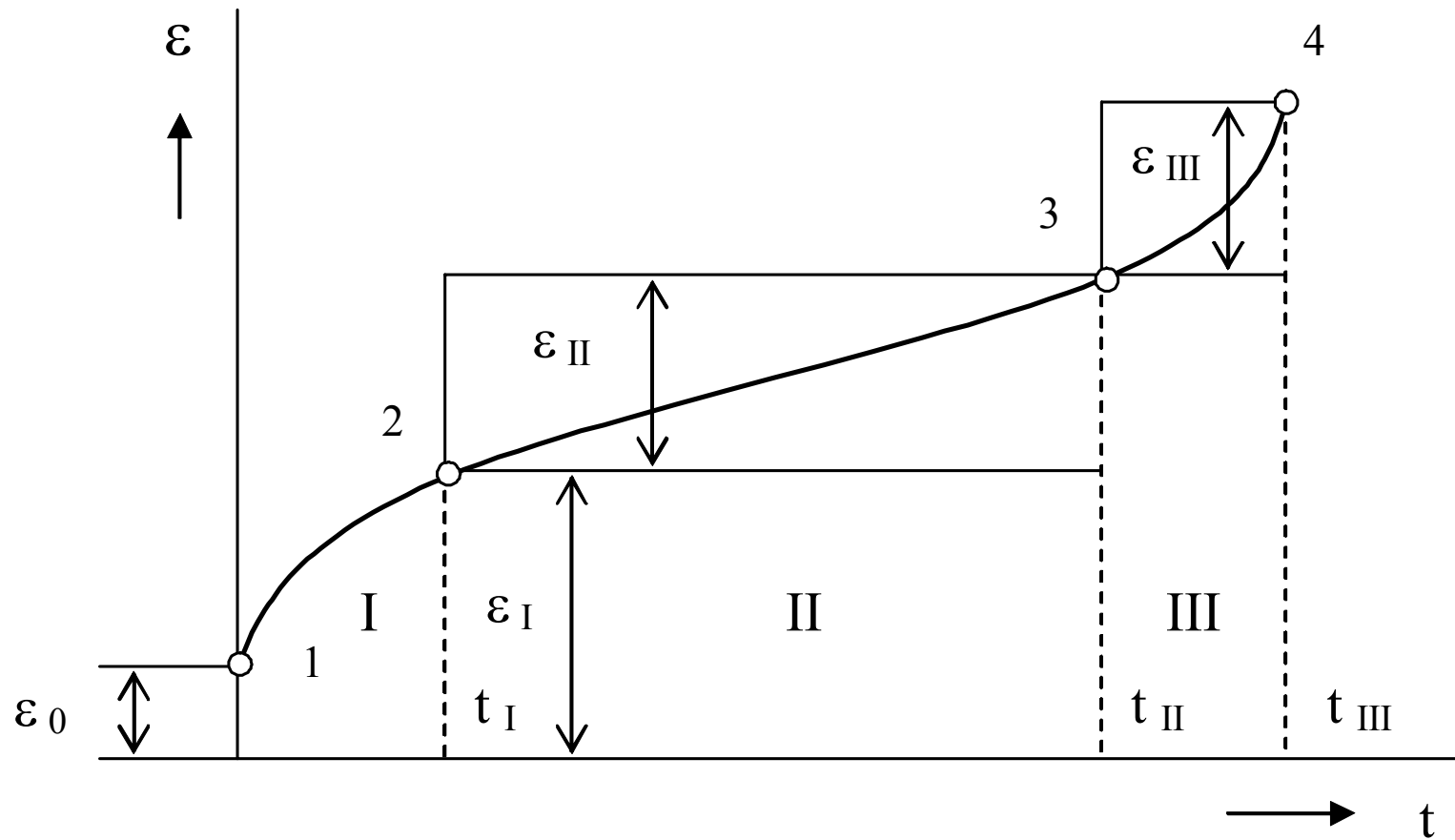
## 4.3 Lomy

- Creepový lom (Lom tečením)
  - Plastická deformácia pri konštantnom zaťažení rastie s časom → tečenie (creep)
  - Vzťah medzi sklzom (deformáciou) a časom  $t$  pri konštantnom napätí  $\sigma$  → krivka tečenia



## 4.3 Lomy

- Creepový lom (Lom tečením)





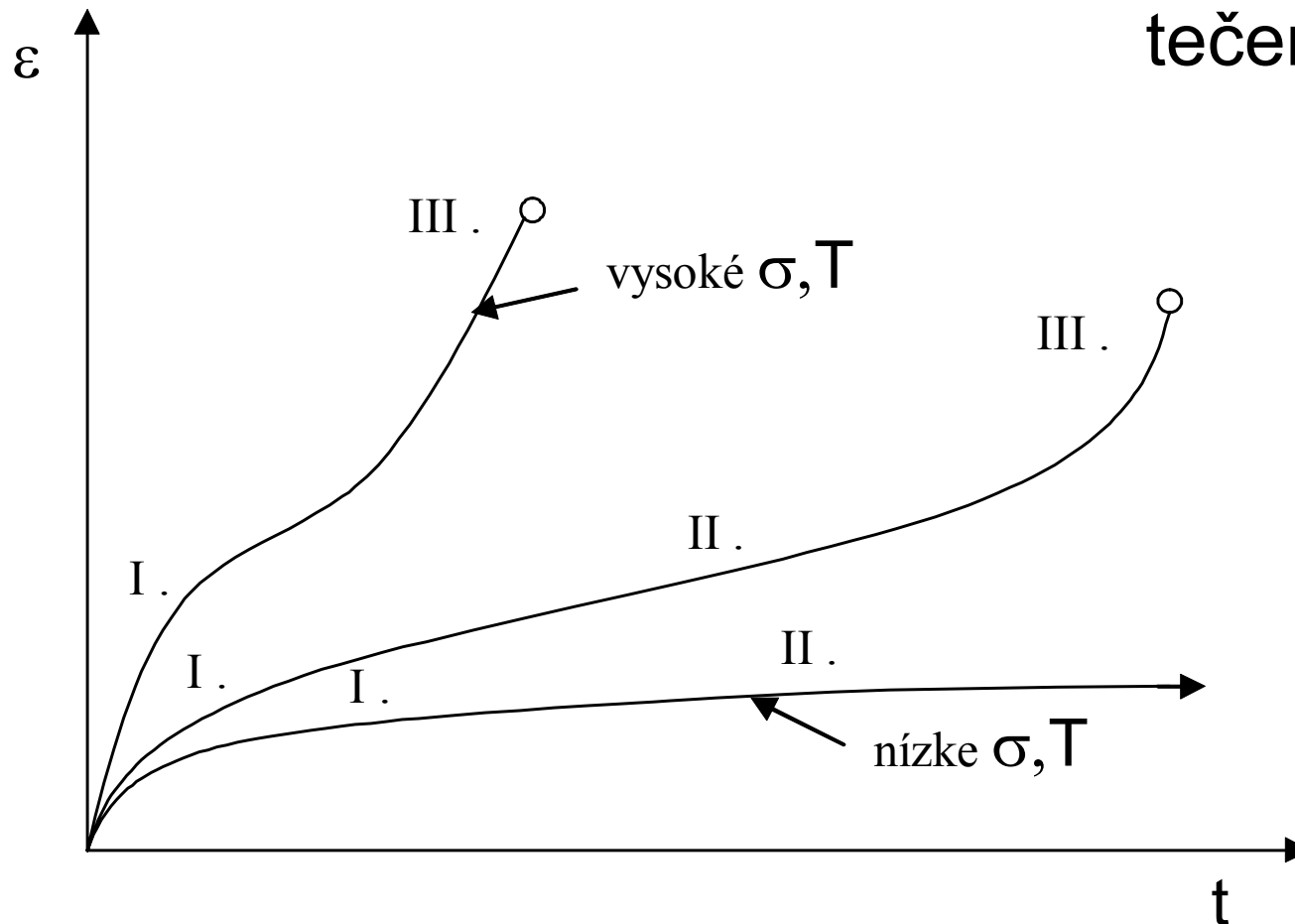
## 4.3 Lomy

- Creepový lom (Lom tečením) – Štádiá tečenia
- I – prechodové (primárne), rýchlosť tečenia klesá
- II – ustálené (stacionárne), rýchlosť je konštantná
- III – zrýchlené (terciálne), rýchlosť vzrastá

## 4.3 Lomy

- Creepový lom (Lom tečením)

krivky tečenia majú rozdielne tvary ← podmienky tečenia ( $\sigma$ ,  $T$ )





## 4.3 Lomy

- Creepový lom (Lom tečením) – Druhy tečenia

Existujú 4 základné druhy tečenia:

dislokačné

difúzne

poklzové (hranice zrn)

superplasticita

[superplasticita → v špeciálnych prípadoch sa polykryštály deformujú viac ako na 1000%]

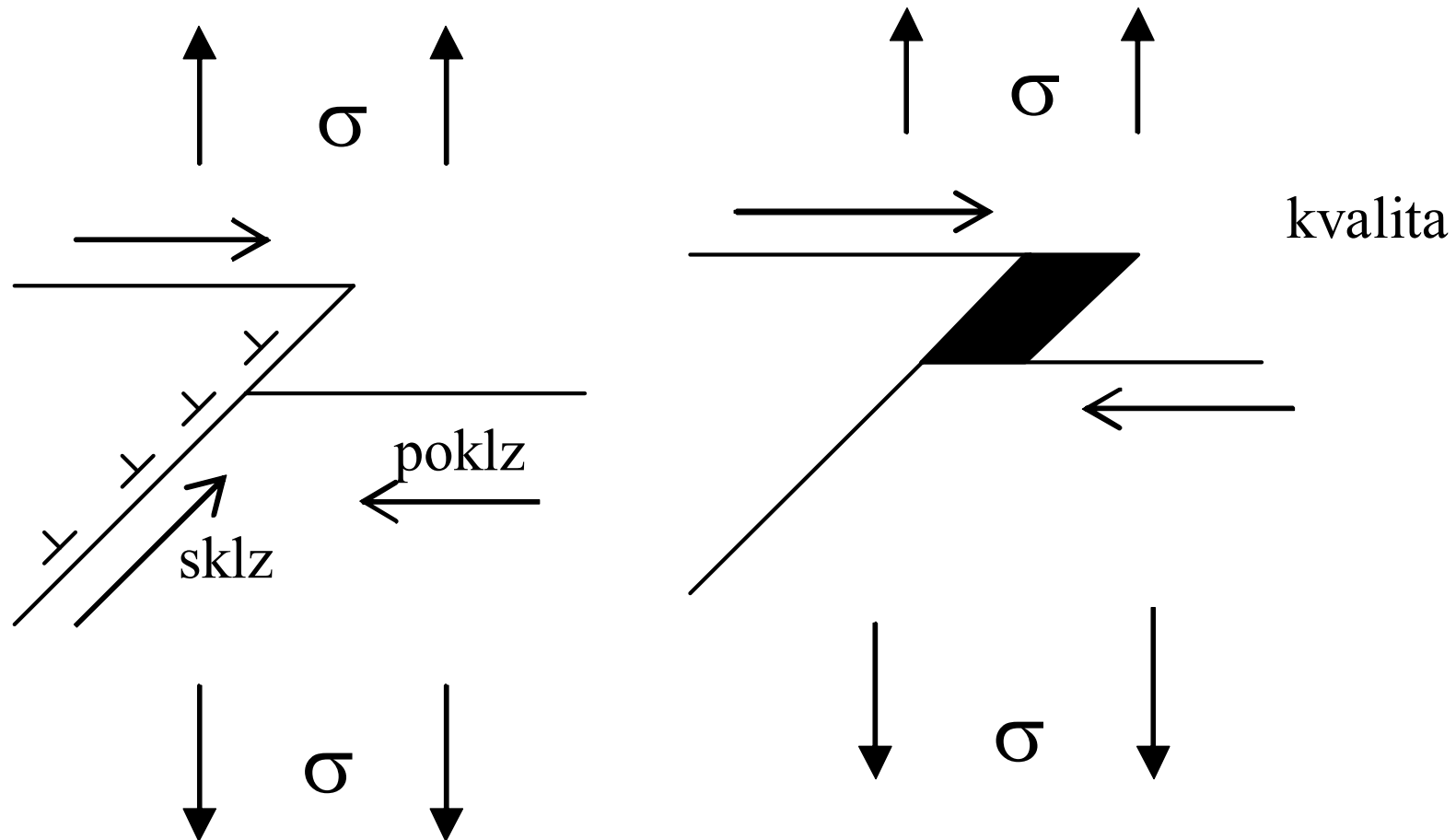


## 4.3 Lomy

- Creepový lom (Lom tečením) – Štádiá lomu
  - Vznik kavít (klinové trhliny na hraniciach 3 zrn)
  - Rast kavít
  - Koalescencia kavít a rast magistrálnej trhliny

## 4.3 Lomy

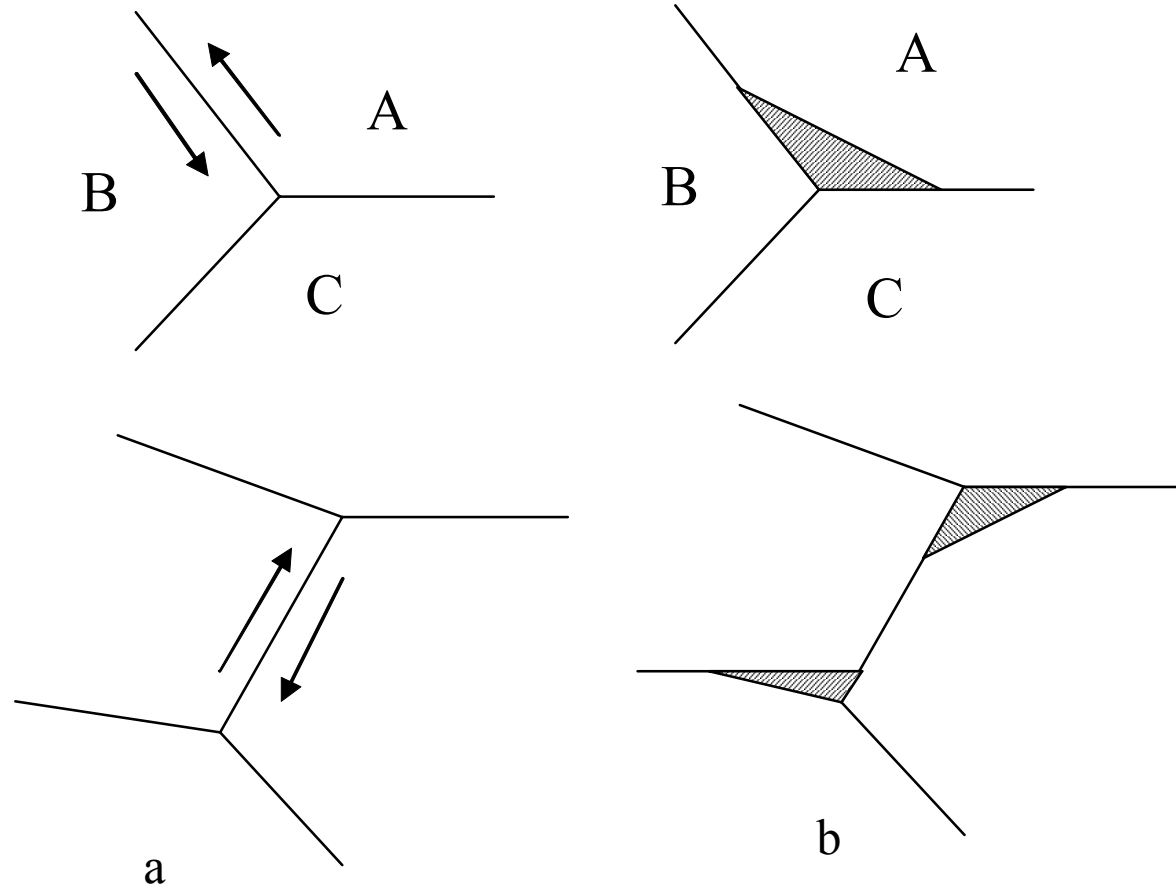
- Creepový lom (Lom tečením) – Štádiá lomu –  
Vznik kavít (trhlín)





## 4.3 Lomy

- Creepový lom (Lom tečením) – Štádiá lomu –  
Vznik kavít (trhlín)





## 4.3 Lomy

- Creepový lom (Lom tečením) – Charakteristiky
  - Medza pevnosti pri tečení  $R_{mT}$  + údaj o čase do lomu  $T_f$  [hod.] + údaj o skúšobnej teplote  $T$ 
    - napr. “ $R_{mT} 10^5/680$ ” (charakteristika  $R_{mT}$  - napätie, ktr. pri danej teplote spôsobí porušenie za stanovenú dobu)
  - Medza tečenia  $R_T$  + trvanie skúšky  $t_\lambda$  do dosiahnutia deformácie  $\varepsilon_p$  [%] + teplota  $T$ 
    - napr. “ $R_T 10^4/1/550$ ” ( $R_T$  - napätie, pri ktr. sa pri danej teplote dosiahne predpísanej deformácie za stanovený čas)

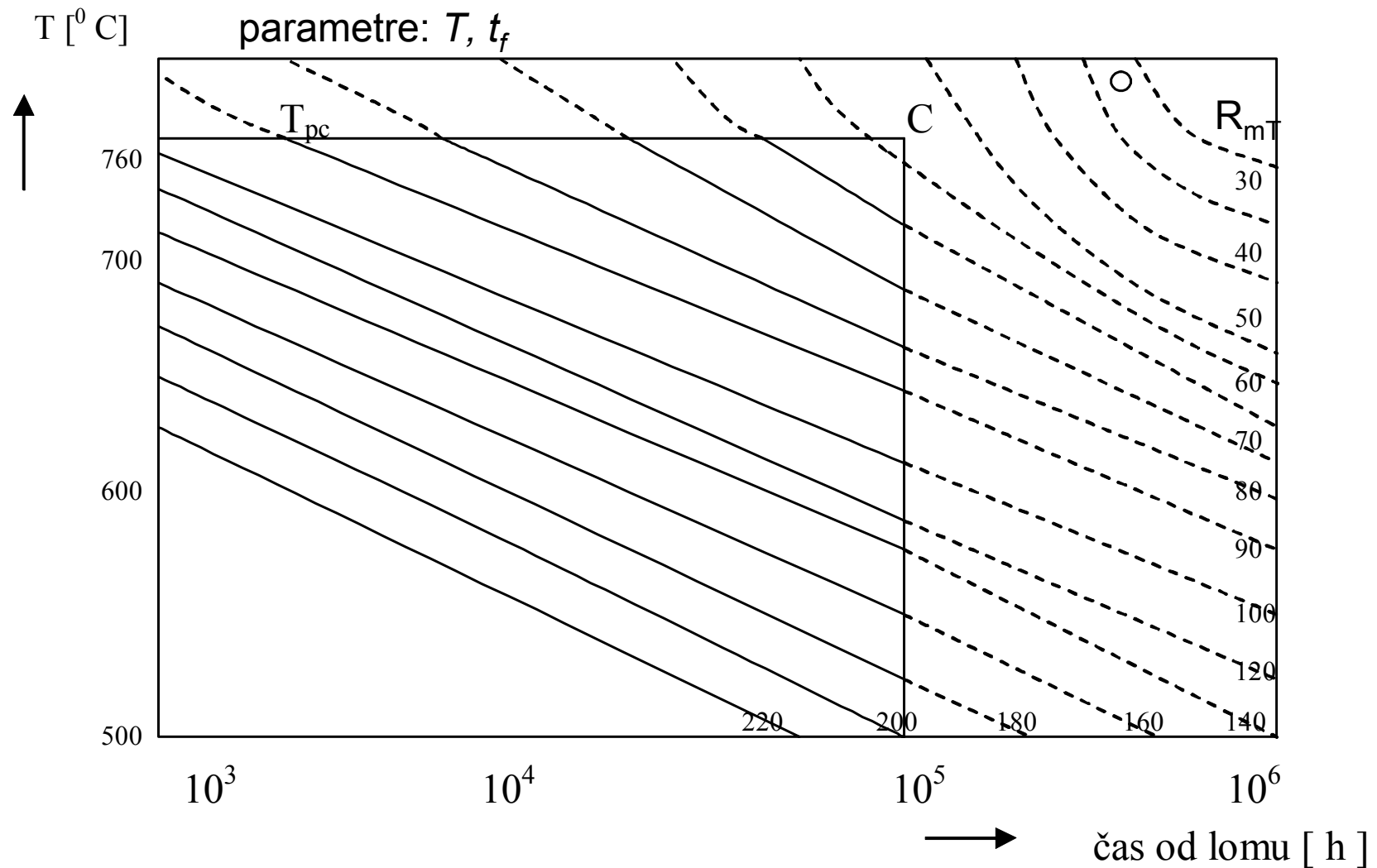


## 4.3 Lomy

- Creepový lom (Lom tečením) – Charakteristiky
  - Charakteristiky  $R_{mT}$  + resp.  $R_T$  pre rôzne časy a teploty  
→ **Diagram životnosti**
  - Vplyv faktorov:
    - veľkosť zrna
    - energia chybovej vrstvy
    - mikročistota
    - hranice zrn
    - atď...

## 4.3 Lomy

- Creepový lom (Lom tečením) – Charakteristiky



## 5. Keramika



- (Úvod)
- Deformácie
- Základné mechanické vlastnosti
- Lom po dlhodobej degradácii

## 5. Keramika



- Kerannini (Gr.) – mieša
- Keramos (Gr.) – vzniknutý miešaním





## 5. Keramika

- definícia: Materiál prevažne kryštalický, zložený hlavne z anorganických zlúčenín nekovového charakteru
- materiály: porcelán, cement, tehly, brúsne materiály, konštrukčná (technická) keramika, šamot



## 5. Keramika

- výroba: použitie jemných zemín → kaolín, íly
- technické materiály: prevažne zo syntetických surovín (vlastnosti iných závisia na vlastnostiach surovín z daného zdroja)

## 5. Keramika



- keramika oxidová: korund  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BeO}$
- keramika neoxidová: karbidy, nitridy, boridy (napr. karbid kremíka  $\text{SiC}$ , nitrid kremíka  $\text{Si}_3\text{N}_4$ )



## 5. Keramika

- Obsahuje: viac kryštalických fáz a často aj fázu sklenú
- Štruktúra: heterogénna, polykryštalická a polyfázová
  - makroskopicky: homogénny materiál → jednotlivé zrná sú usporiadané náhodne, vnútri jednotlivých zrn sa však vlastnosti líšia → pnutie medzi jednotlivými kryštálmi (mikronapätie)



## 5. Keramika

- Ovplyvnenie vlastností:
  - vlastnosti skla (sklenej fázy)
  - prítomnosť pórov
- vlastnosti:
  - vysoká pevnosť
  - krehkosť
  - nie sú tvárne (schopnosť plastickej deformácie – typická pre kovy)
  - nie sú húževnaté (schopnosť absorpcie energie pri porušovaní – typická pre kovy)



## 5. Keramika

- Vázby:
  - iónová
  - kovalentná
- Pórovitosť:
  - $P = (\rho - \rho_v) / \rho \cdot 100\%$
  - kde  $\rho_v$  je hmotnosť jednotkového objemu obsahujúceho póry
  - ak  $P < 5\% \rightarrow$  keramika je vákuovo tesná
- Objemová hmotnosť:
  - 2500 až 3000 kg/m<sup>3</sup>





## 5.1 Deformácia

- Elastická deformácia
  - elasticky izotropná (polykryštalická keramika):
    - Youngov modul  $E$ ; modul pružnosti v ťahu:
      - 70000 MPa (porcelán) až 480000 MPa (lisovaný SiC), resp. ešte viac (karbidy WC, TiC) alebo aj podstatne menej (keramika pre tepelné izolácie)
  - Poissonovo číslo  $\nu = 0,17 - 0,36$  (v priemere 0,25)



## 5.1 Deformácia

- Anelastická deformácia
  - na rozdiel od kovov – neexistuje pohyb dislokácií, aj keď oni principiálne pohyblivé sú



## 5.1 Deformácia

- Plastická deformácia
  - Dislokácie → iný význam ako u kovov → malá aktívna úloha v keramike
  - Iónové a kovalentné väzby → obmedzenie plastickej deformácie (dôvody: menší počet sklzových systémov, vyššie PN napätie) → pri nízkych a stredných teplotách sú hranice zrn prekážkou pohybu dislokácií
  - Skúša sa väčšinou tlakom (pri skúške ťahom dochádza k lomu už pri malej plastickej deformácii)



## 5.1 Deformácia

- Plastická deformácia
  - von Misesovo kritérium (principiálne geometrické dôvody):

Pri plastickej deformácii polykryštalických materiálov musí mať mriežka 5 nezávislých sklzových systémov, aby jednotlivé zrná mohli nadobudnúť ľubovoľného tvaru → t. j. vzájomne sa prispôsobovať, nevznikajú medzi nimi trhliny

Pri veľa keramických materiálov toto splnené nie je → môže dôjsť k medzikryštalickému lomu skôr ako sa vynúti činnosť vedľajších sklzových systémov.

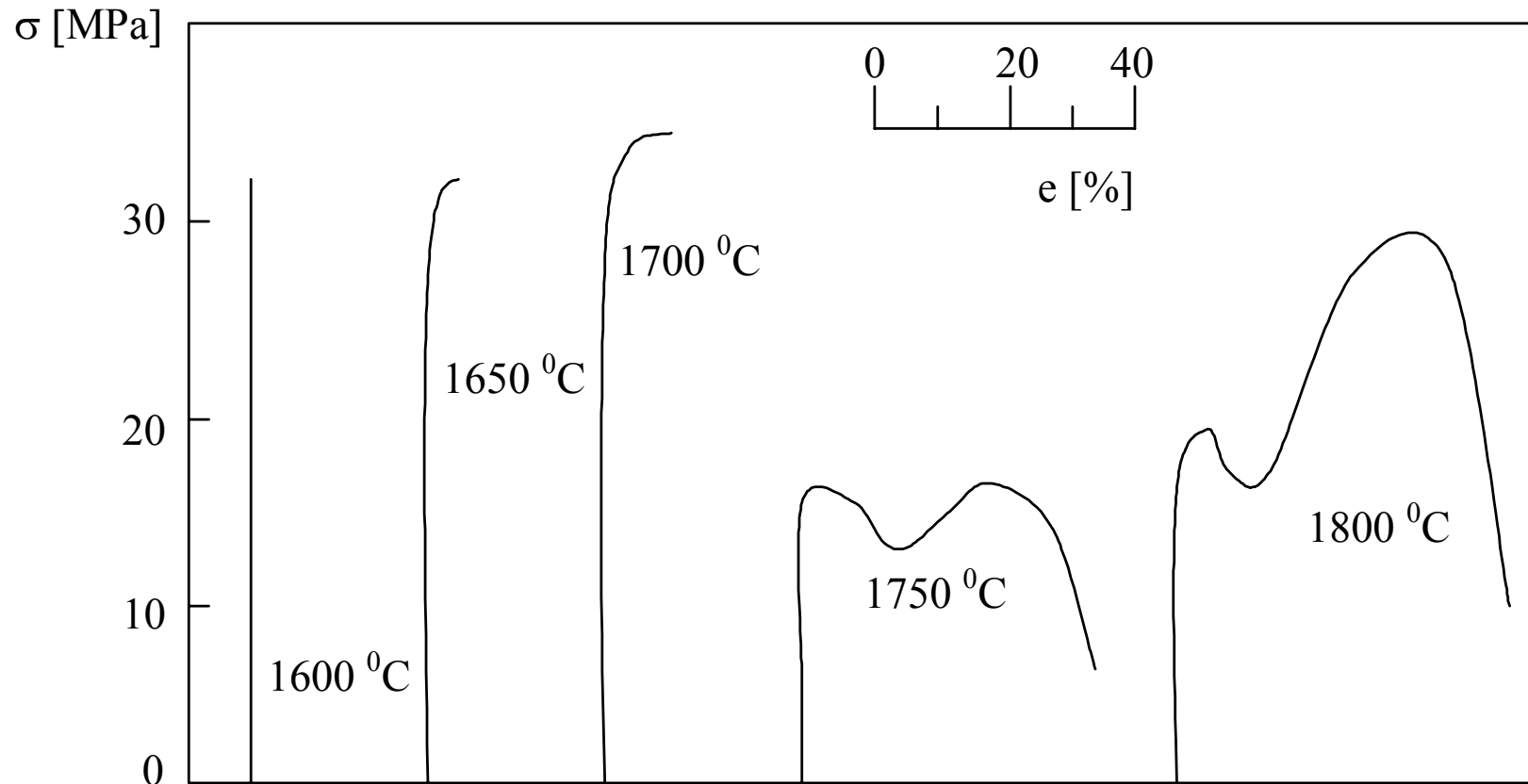


## 5.1 Deformácia

- Plastická deformácia
  - kovová väzba → málo závislá na presnom usporiadaní susediacich zrn a je blízka pevnosti vnútri zrn
  - kovalentné väzby → smerové, krátkeho dosahu → zmena najbližších susedov má vplyv na vlastnosti → zmenšenie pevnosti hranice zrn
  - keramika: pevnosť na hraniciach zrn cca 50% pevnosti vnútri zrn. Prímеси a póry znižujú pevnosť na hraniciach zrn o cca 1 rád

# 5.1 Deformácia

- Plastická deformácia







## 5.1 Deformácia

- Plastická deformácia
  - výrazná vlastnosť: existencia prechodovej teploty  $T_P$ , pod ktorou nie sú schopné plastickej deformácie, príčiny:
    - 1. nesplnenie von Misesovho kritéria (MgO)
    - 2. malá pohyblivosť dislokácií, veľké PN napätie (diamant)
    - 3. 1. + 2. ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ...)
  - + vlastnosti hranice zrn
  - pri niektorých keramických materiáloch dochádza k mäknutiu sklenej fázy, takže zvyšovanie teploty nad  $T_P$  nie je možné

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Pevnosť
  - Pružná deformácia až do okamihu náhleho lomu. Prebieha makroskopicky krehký lom.
  - 1. porušenie je takmer stále vyvolané účinkom ťahových napätí
  - 2. pevnosť v tlaku je niekoľkonásobne ( $10 \times$ ) vyššia ako pevnosť v ťahu
  - 3. pevnosť rovnakých vzoriek kolíše (10 – 30%)
  - 4. porušenie vychádza z povrchu
  - 5. priemerná pevnosť je tým menšia, čím menšie sú rozmery telesa (resp. zaťaženej oblasti)

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Pevnosť

Materiál	Porcelán	Steatit	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 99,5%	ZrO <sub>2</sub> stabilizovaný	MgO	SiC	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
E (GPa)	70-80	70-100	400	150- 210	200- 300	140- 300	210- 310
R <sub>mo</sub> (MPa)	40-100	80-140	300- 400	100- 200	100	200- 400	600- 800

R<sub>mo</sub> – pevnosť v ohybe

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Pevnosť

S teplotou pevnosť keramiky klesá, za vysokých teplôt klesá rýchlejšie

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Pevnosť

faktory znižujúce pevnosť:

1. štruktúrne defekty atomárnych rozmerov
2. chyby a koncentrátoory napätí príslušiace mikroštruktúre keramiky
3. povrchové mikrotrhliny a chyby
4. trhliny a chyby vzniknuté nesprávnym technologickým postupom
5. rozdielnosť fyzikálnych vlastností jednotlivých fáz

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Pevnosť

faktory znižujúce pevnosť:

1. štruktúrne defekty atomárnych rozmerov  
vplyv dislokácií → ešte viac znižujú pevnosť na  
hraniciach zŕn



## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Pevnosť

faktory znižujúce pevnosť:

2. chyby a koncentráto­ry napätí príslušiac­e mikroš­truktú­re keramiky

zrná navzájom, resp. zrná – sklená fáza, póry  
(koncentrujú napätia), nepravidelné tvary kryštalických zrn

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Pevnosť

faktory znižujúce pevnosť:

### 3. povrchové mikrotrhliny a chyby

časť povrchových chýb je rovnakého charakteru ako vnútri keramiky (rozhrania zŕn, póry, praskliny...). Výraznejšie trhliny vznikajú pri mechanickom opracovaní (brúsenie, rezanie...), pri nárazoch a pod. Nebezpečný je napr. úder letiacou časticou → zanedbateľná plasticita → vznik vysokých napätí v mieste nárazu.

Ďalej: chemické reakcie a pod.

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Pevnosť

faktory znižujúce pevnosť:

4. trhliny a chyby vzniknuté nesprávnym technologickým postupom

nesprávne technologické postupy pri tvarovaní, sušení, vypaľovaní ...

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Pevnosť

faktory znižujúce pevnosť:

5. rozdielnosť fyzikálnych vlastností jednotlivých fáz  
rozdielny súčiniteľ teplotnej rozťažnosti  
(mikronapätia), rozdielnosť elastických konštánt pri  
deformácii vzorku (vzorka sa deformuje ako celok)

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Pevnosť

faktory znižujúce pevnosť:

- + vplyv rozmerov telesa

s narastajúcimi rozmermi zaťaženej oblasti rastie pravdepodobnosť výskytu väčších a nebezpečných chýb

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Lomová húževnatosť

Lom (delenie telesa na 2, resp. viac častí), neprebehne v telese naraz:

proces iniciácie trhliny

proces šírenia trhliny

Zárodok vzniká pri plastickej deformácii alebo pri výrobe (apriórne trhliny)

Typický lom: ***krehký***



## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Lomová húževnatosť

Energia potrebná na vznik jednotkovej plochy trhliny → efektívna lomová energia  $V_{ef}$ :

$$V_{ef} = 2V_0 + V_{Pl} + V_{Pr} + V_{kin}$$

$V_0$  – povrchová energia, pre pevné látky = 1 J/m<sup>2</sup> pri 0K

$V_{PL}$  – energia absorbovaná pri pohybe dislokácií pred čelom trhliny (zvyčajne sa mení na teplo)

$V_{Pr}$  – energia absorbovaná pred čelom trhliny inými procesmi (napr. mikrotrhliny)

$V_{kin}$  – kinetická energia (zanedbateľná)

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Lomová húževnatosť

húževnatosť kovov → plastická zóna pred čelom trhliny so silnou absorpciou energie →  $V_{PI} = 10^4 - 10^5 \text{ J/m}^2$  (o niekoľko rádov viac ako  $2V_0$ )

keramika: nevytvorí sa účinná plastická zóna

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Lomová húževnatosť

Lomová húževnatosť  $K_{IC}$ :

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{E V_{ef}}{1 - \nu^2}}$$

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Lomová húževnatosť

	Kovy	Keramika
$K_{IC}$ [MPa.m <sup>1/2</sup> ]	50-200	1-10

- Keramika nemá dostatočnú ochranu proti šíreniu trhliny!

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Metódy zvyšujúce pevnosť a lomovú húževnatosť
- Zvyšovanie pevnosti:
  - Zmenšenie veľkosti kritických chýb (technológia výroby, dodržiavanie technologických postupov)
  - Znižovanie vnútorných napätí - zmenšovanie veľkosti zrn (zhoršia sa energetické podmienky pre šírenie trhliny)
  - povrchové ochranné vrstvy (glazúry a pod.)

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Metódy zvyšujúce pevnosť a lomovú húževnatosť
- Zvyšovanie lomovej húževnatosti:
  - výrazné zvýšenie pevnosti hranice zrn
  - zvýšenie manévrovateľnosti dislokácií (prímiesy)
  - zvýšenie hustoty pohyblivých dislokácií
  - technológie znižujúce prechodovú teplotu
  - vývoj viacfázových keramických materiálov



## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Metódy zvyšujúce pevnosť a lomovú húževnatosť
- Zvyšovanie lomovej húževnatosti – koef.  $K_{IC}$ :
  - optimalizácia mikroštruktúry
  - využitie procesov tieniacich špici trhliny (transformačné spevnenie)
  - vytváranie kompozitov

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Optimalizácia štruktúry
  - obmedzenie sklenej fázy (trhlina sa šíria práve cez túto fázu)
  - minimalizácia veľkosti zrna + homogénna mikroštruktúra (zmenšovanie zrna má svoje hranice → v skle sa šíri trhlina dobre) – optimálne veľkosti zrna = desatiny  $\mu\text{m}$
  - tvar zrn (+ prísady – nečistoty)

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Transformačné spevnenie
  - transformačná zóna = oblasť pred čelom trhliny
  - vhodné prísady + špeciálne tepelné spracovanie
  - technológia miešania chemických prvkov
  - úspech: cca 3 x lepšie parametre  $V_{ef}$ ,  $R_{mo}$

## 5.2 Základné mechanické vlastnosti



- Vytváranie kompozitov
  - vkladanie vlákien z iného materiálu, tieto pomáhajú prenášať zaťaženie (molybdénové vlákna, vlákna z legovaných ocelí, wolfrámové vlákna...). Ich priemer →  $\mu\text{m}$ , dĺžka → mm.

Nevýhoda: obmedzenie teploty použitia

## 5.3 Lom po dlhodobej degradácii



- Lom koróziou pod napätím
- Únavový lom
- Creepový lom
  
- V keramike môže nastať krehký lom alebo môže dôjsť k podkritickému šíreniu trhliny vplyvom korózných procesov, cyklického zaťaženia alebo difúzných pochodov.

## 5.3 Lom po dlhodobej degradácii



- Lom koróziou pod napätím
- Šírenie trhlín vplyvom tepelnej aktivácie alebo chemickej reakcie s prostredím (aj účinkom vodných pár)
- Príčina: statická únava → pri záťaži konštantným napätím trhlina rastie, až po určitej dobe  $t_f$  (doba života, životnosť) dosiahne kritickej dĺžky  $a_c$  a prebehne krehký lom.



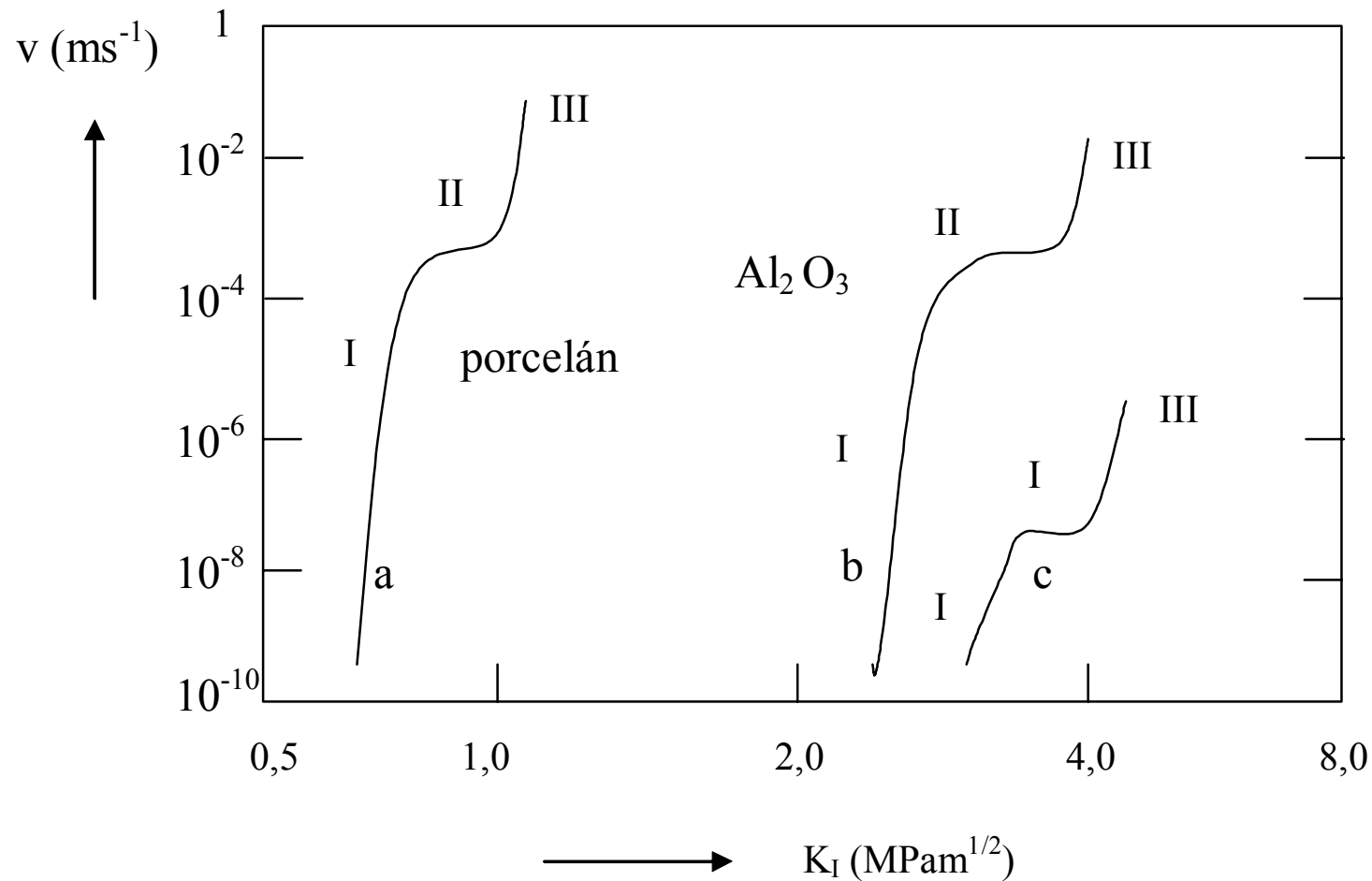
## 5.3 Lom po dlhodobej degradácii



- Lom koróziou pod napätím
- charakteristiky:  
napr.: rýchlosť šírenia trhliny vs. faktor intenzity napätia

## 5.3 Lom po dlhodobej degradácii

- Lom koróziou pod napätím



## 5.3 Lom po dlhodobej degradácii



- Únavový lom
  - Cyklické zaťaženie → únavový lom, existuje i v keramike,
  - Faktory: štruktúra materiálu, charakter zaťažovania (ťah, tlak resp. ich kombinácia)

## 5.3 Lom po dlhodobej degradácii

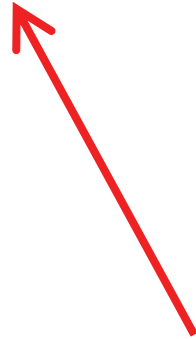


- Creepový lom
  - vysoké teploty + nízke napätia → tečenie (pri dlhodobom zaťažení)
  - trvalá deformácia (podľa teploty) môže byť až niekoľko percent → susediace zrná nestačia prispôbovať svoje tvary deformácii → vzniká množstvo mikrotrhlín. Vplyv má i prítomnosť sklenej fázy.

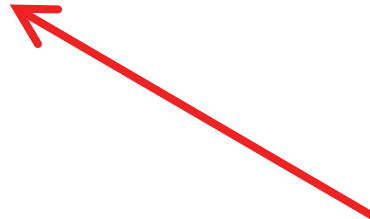
## 5.3 Lom po dlhodobej degradácii

- Creepový lom

$$\dot{\varepsilon} = k\sigma^n e^{-\frac{t_0}{t}}$$



rýchlosť deformácie



absolútna teplota

Tečenie pri keramike: od  $0,5 T_m$  (teplota topenia) –  
prítomnosť pórom a sklenej fázy

## 5.3 Lom po dlhodobej degradácii



- Morfológia lomovej plochy
  - rovnaká plocha pri krehkom lome ako aj pri lome po dlhodobej degradácii



## 5.3 Lom po dlhodobej degradácii

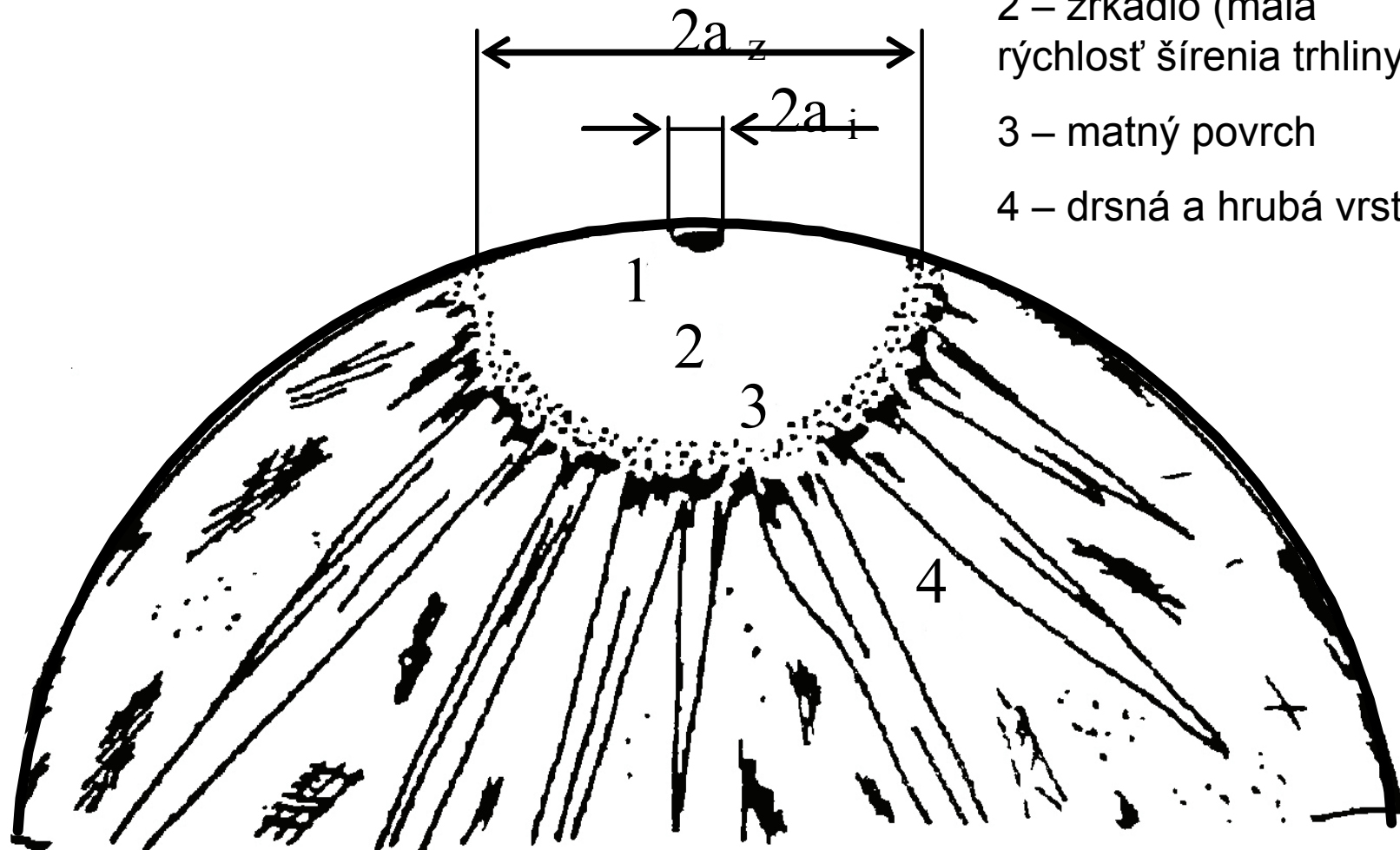
- Morfológia lomovej plochy

1 – ohnisko lomu

2 – zrkadlo (malá rýchlosť šírenia trhliny)

3 – matný povrch

4 – drsná a hrubá vrstva



## 6. Plasty



- Fyzika deformácie a porušenia
- Základné mechanické vlastnosti
- Medzné stavy

## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



- deformácie
- porušovanie
- popis deformačných vlastností



## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia

- Polyméry – dlhé reťazce → prepojenie atómov silnými kovalentnými väzbami → obtiažna elastická deformácia
- Vnútri reťazca: rotácia → ak je uhol prepojenia prvkov reťazca  $< 180^\circ$  → makroskopicky: ohybnosť
- medzireťazcové väzby → Van der Waalsovho typu. Ovplyvnenie: vonkajšia sila, zvýšená teplota

## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Deformácie:

- vysoké teploty → prekonanie medzireťazcových väzieb → voľný posun častí → správanie sa kvapaliny. Vzťahy: rovnaké ako v hydrodynamike (Eyringova rovnica)

## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



### Deformácie

- Pohyb molekúl po sebe → prekonanie bariéry medzi dvomi metastabilnými polohami
- Bez vonkajšieho namáhania → pravdepodobnosť pohybu vo všetkých smeroch rovnaká
- Vonkajšie namáhanie → zníženie energetickej bariéry v smere silového poľa (o hodnotu úmernú tomuto pôsobeniu) a naopak, zvýši o túto hodnotu v opačnom smere. Výsledok → makrospokický pohyb kvapaliny





## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia

Deformácie

$$\frac{d\gamma}{dt} = 2 \frac{nl}{h} KT^{-\frac{\delta F}{KT}} \cdot \sinh \frac{\tau l}{2NKT}$$

kde

$\gamma$  je šmyková deformácia

t čas

$\tau$  šmykové napätie

l dĺžka preskoku segmentu

K Boltzmanova konštanta

T absolútna teplota

$\delta F$  aktivačná voľná energia preskoku

n hustota procesov na jednotku dĺžky

N hustota procesov na jednotku plochy

h Planckova konštanta

## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Deformácie:

- Rozdiel medzi ideálnym chovaním sa kvapaliny a „polymérovej kvapaliny“ → závislosť viskozity  $\mu$  na rýchlosti deformácie  $d\gamma/dt$

## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Deformácie:

- ak sú polymérové reťazce prepojené chemickými väzbami → „kaučuková“ pružnosť:

Sila pôsobiaca na teleso v smere vonkajšej deformácie:

$$f = \frac{dF}{dx}$$

kde  $F$  je voľná energia:

$$F = U - TS$$

$U$  – energia systému,  $S$  – entropia,  $T$  – absolútna teplota



## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia

Deformácie:

- pri deformácii kryštálov sa usporiadanosť nemení  
→ nemení sa ani entropia
- V prípade natáhovania polymérového reťazca z „klbka“ entropia klesá,  $U$  ostáva konštantné → polymérová sieť pôsobí proti deformácii:

$$f = -T \frac{dS}{dx}$$

(s rastúcou teplotou sila stúpa!)



## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia

Deformácie:

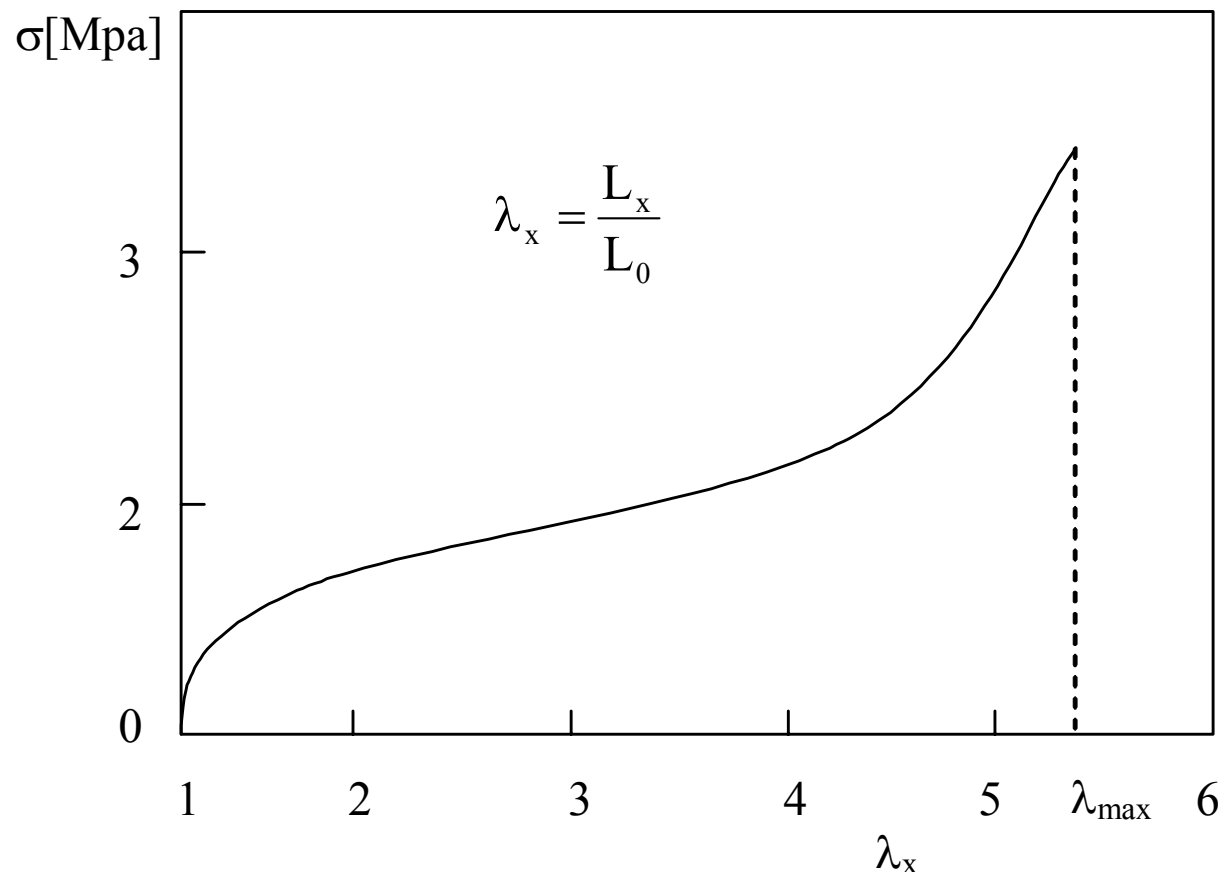
- Teplotná závislosť entropie polymérovej siete → rovnice podobné stavovým rovniciam ideálneho plynu
- obmedzenia:
  - konečná dĺžka reťazcov
  - konečný počet aktívnych reťazcov

# 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Deformácie:

- namáhanie ťahom:





## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Deformácie:

- ďalšie vlastnosti kaučukovej pružnosti:
  - existuje veľké množstvo priestorových usporiadaní → pri rýchlej deformácii sa tieto nestačia zrealizovať → uvedené vzťahy medzi deformáciou a napätím neplatia



## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia

Deformácie:

- iné typické deformácie väzieb medzi atómami spojené so zmenou vnútornej energie  $U$ :
  - deformácie dĺžky vnútorných väzieb reťazca
  - deformácie uhlov väzieb
  - deformácie slabých medzimolekulárnych väzieb

## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Deformácie:

- Viskoelastické látky →  
dlhodobé hľadisko = kvapalina  
krátkodobé hľadisko = pružná látka

# 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Deformácie:

- Plasty → väčšinou dôležitá nadmolekulárna štruktúra → heterogénne látky, jednotlivé fázy sa líšia v
  - hustote
  - stupni usporiadania
  - chemickom zložení

## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Porušovanie:

- Pri deformácii môže dôjsť k porušeniu väzieb → treba na to dostatok energie (chemická, žiarenie, vplyv vonkajších síl a pod.)
- zdanie = treba dostatočne veľkú vonkajšiu silu. Atómy však vykonávajú aj tepelný pohyb → môže dôjsť k lokálnemu nahromadeniu kinetickej energie.

## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Porušovanie:

- Pravdepodobnosť, že dôjde k porušeniu väzby:

$$p = A e^{-\frac{\delta F}{KT}}$$

- kde  $\delta F$  je aktivačná voľná energia (spojená s prekonaním energetickej bariéry väzby),  $K$  je Boltzmanova konštanta



## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Porušovanie:

- Voľná energia sa môže znížiť o pôsobenie vonkajších síl  $f$  o hodnotu  $f \cdot l$ , kde  $l$  je rozdiel vzdialenosti atómov pri porušovaní väzby:

$$p = A \frac{\delta F - fl}{KT}$$

- („A“ môže byť elastická konštanta  $G$ , šmyková deformácia, teplota a pod.)

## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



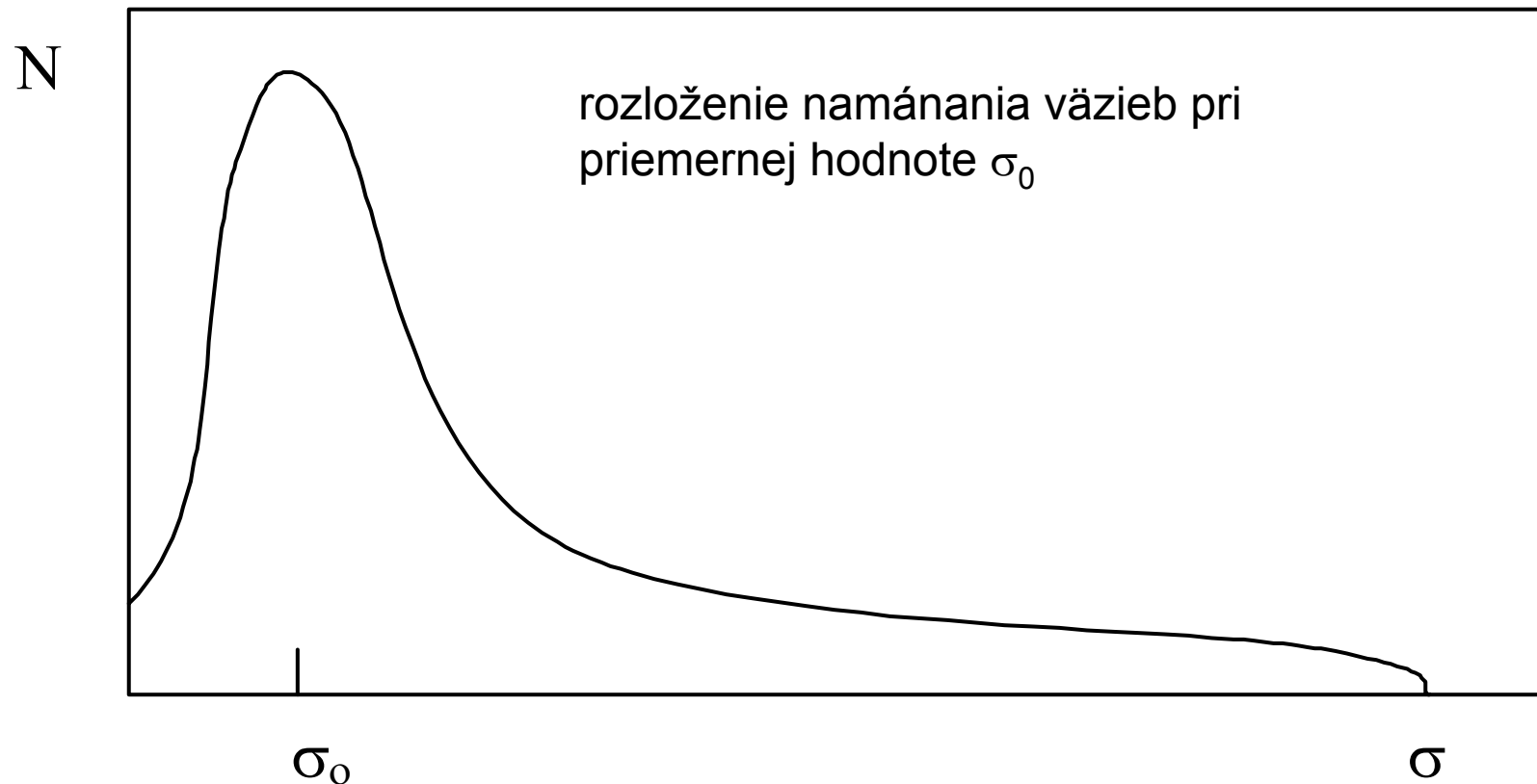
Porušovanie:

- Za určitých okolností môže dôjsť po porušení väzby medzi dvomi atómmi opäť k ich spojeniu, alebo, odtrhnuté atómy dodajú svoju nadbytočnú energiu susedom a dôjde k reťazovej reakcii trhania makromolekúl

# 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Porušovanie:



## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Porušovanie:

- O odolnosti polymérov rozhoduje:
  - pevnosť primárnych väzieb
  - pravdepodobnosť spojenia porušených reťazcov
  - pravdepodobnosť prenosu voľnej energie na ďalšie reťazce



## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia

Popis deformačných vlastností:

- Vykazujú sa vlastnosti kvapalín i pružných látok, prejavuje sa to hlavne:
  - tečením → ak je teleso z polyméru pod stálym mechanickým napätím,
  - relaxáciou napätia → pri deformácii o konštantnej hodnote s časom napätia v telese klesnú,
  - hysteréziou → pri periodickom zaťažovaní je deformácia posunutá voči napätiu (hysterézna slučka)

# 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Popis deformačných vlastností:

- Modely:
  - Maxwellov model
  - Kelvinov (Voigtov) model



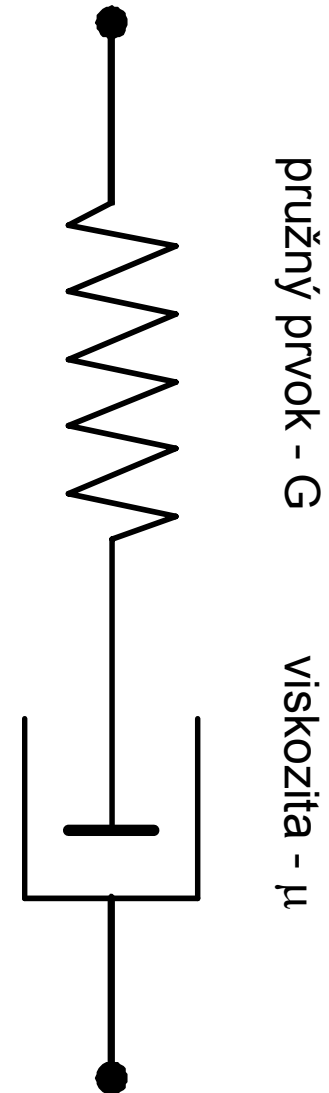
# 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Popis deformačných vlastností:

Maxwellov model 
$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\mu}$$

kde  $\mu$  je viskozita,  $\gamma$  deformácia  
 $\tau$  šmykové napätie,  $G$  modul  
pružnosti v šmyku



# 6.1 Fyzika deformácie a porušenia

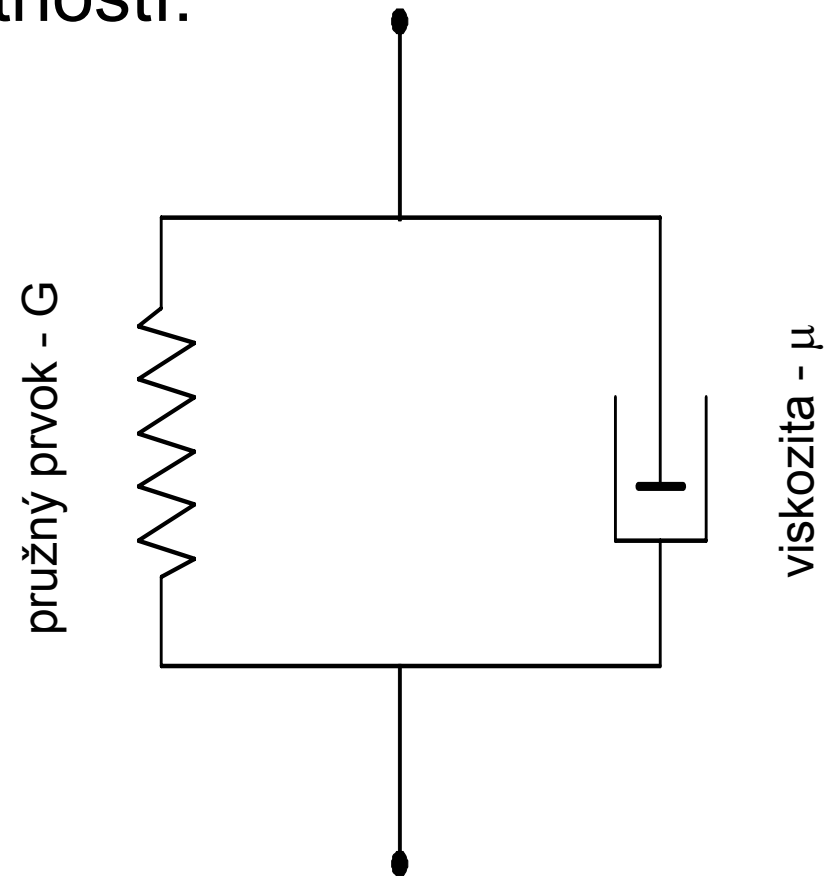


Popis deformačných vlastností:

Kelvinov (Voigtov) model

$$\tau = G\gamma + \mu \frac{d\gamma}{dt}$$

kde  $\mu$  je viskozita,  $\gamma$  deformácia  
 $\tau$  šmykové napätie,  $G$  modul  
pružnosti v šmyku



## 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



Popis deformačných vlastností:

Výsledok → diferenciálne rovnice, treba ich vyriešiť  
→ dostatočne presne popisujú chovanie sa  
plastov len pri určitom type namáhania:

Maxwell → relaxácia napätí

Kelvin → tečenie (creep)

# 6.1 Fyzika deformácie a porušenia



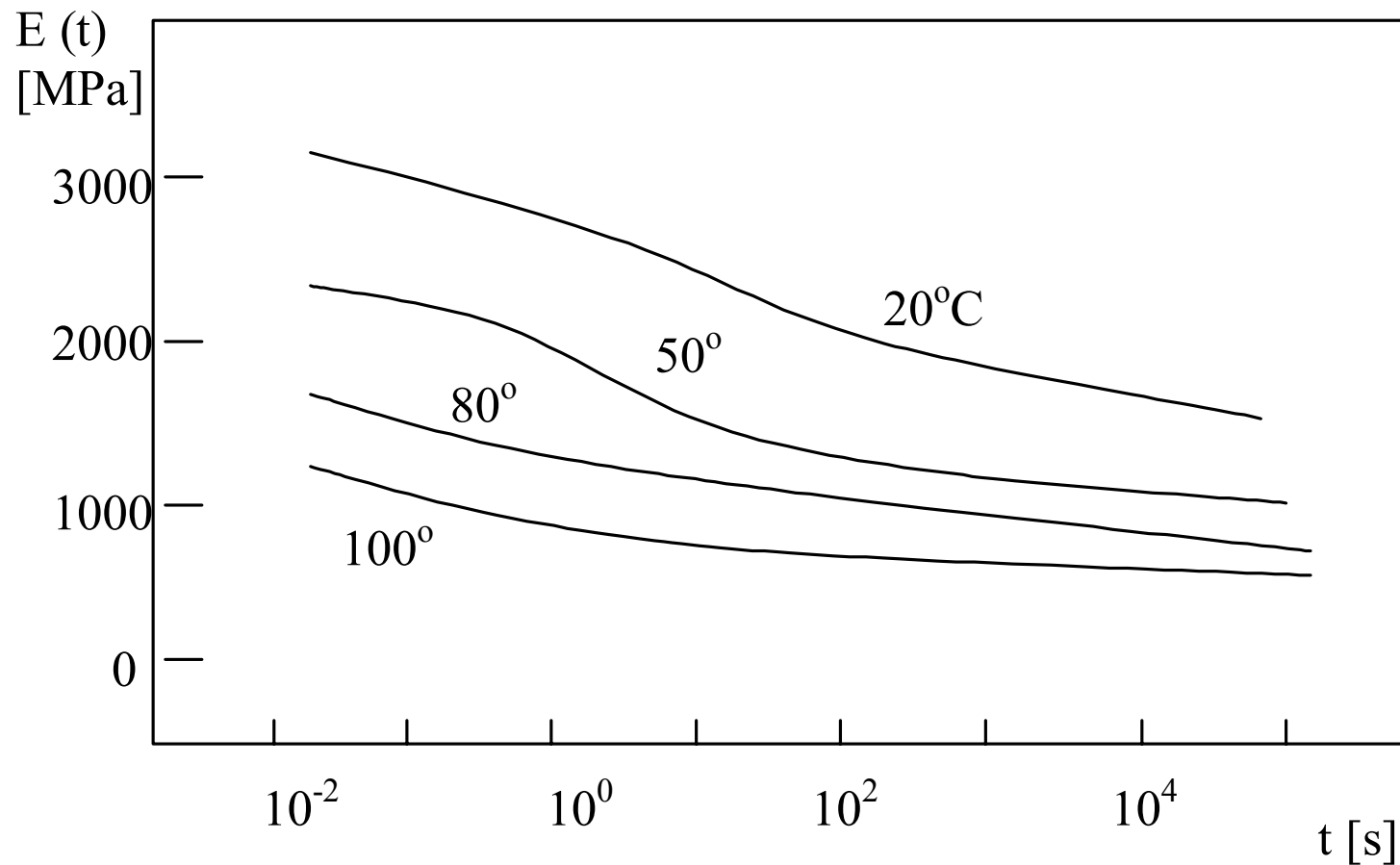
Popis deformačných vlastností:

Model:	Tečenie	Relaxácia
Maxwell	$\gamma = \gamma_0 + \frac{\tau_0}{\mu} t$ $\tau = \tau_0$	$\tau = G\gamma_0 e^{-\frac{tG}{\mu}}$ $\gamma = \gamma_0$
Kelvin	$\gamma = \frac{\tau_0}{G} \left( 1 - e^{-\frac{tG}{\mu}} \right)$ $\tau = \tau_0$	$\tau = G\gamma_0$ $\gamma = \gamma_0$

# 6.1 Fyzika deformácie a porušenia

Popis deformačných vlastností:

Príklad: creepový modul v ťahu (nameraný)



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



- Sklené polyméry
- Kryštalické polyméry
- Elastomery





## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

Sklené polyméry (= sklené plasty)

- amorfné polyméry pod teplotou skleného prechodu:
  - polystyrén
  - nemäkčený polyvinylchlorid (PVC)
  - polymetylmetakrylát (PMMA)



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

### Sklené polyméry

- Malé deformácie:

Slabé medzireťazcové väzby (Youngov modul pružnosti = 1 GPa) → pri dlhom pôsobení napätia môže prísť k preskoku atómov alebo celých segmentov medzi dvomi metastabilnými polohami

Pri krátkodobom pôsobení a za nízkych teplôt sa viskózne vlastnosti neprejavajú → elastické správanie sa → platia tu klasické vzťahy (Youngov modul, Poissonova konštanta, elastické konštanty...)



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

Sklené polyméry

- Veľké deformácie:

Veľká deformácia = nelineárne správanie sa + plasticita.

Metódy skúmania: totožné s metódami pre neviskoelastické materiály (pri stálej teplote a konštantnej rýchlosti)

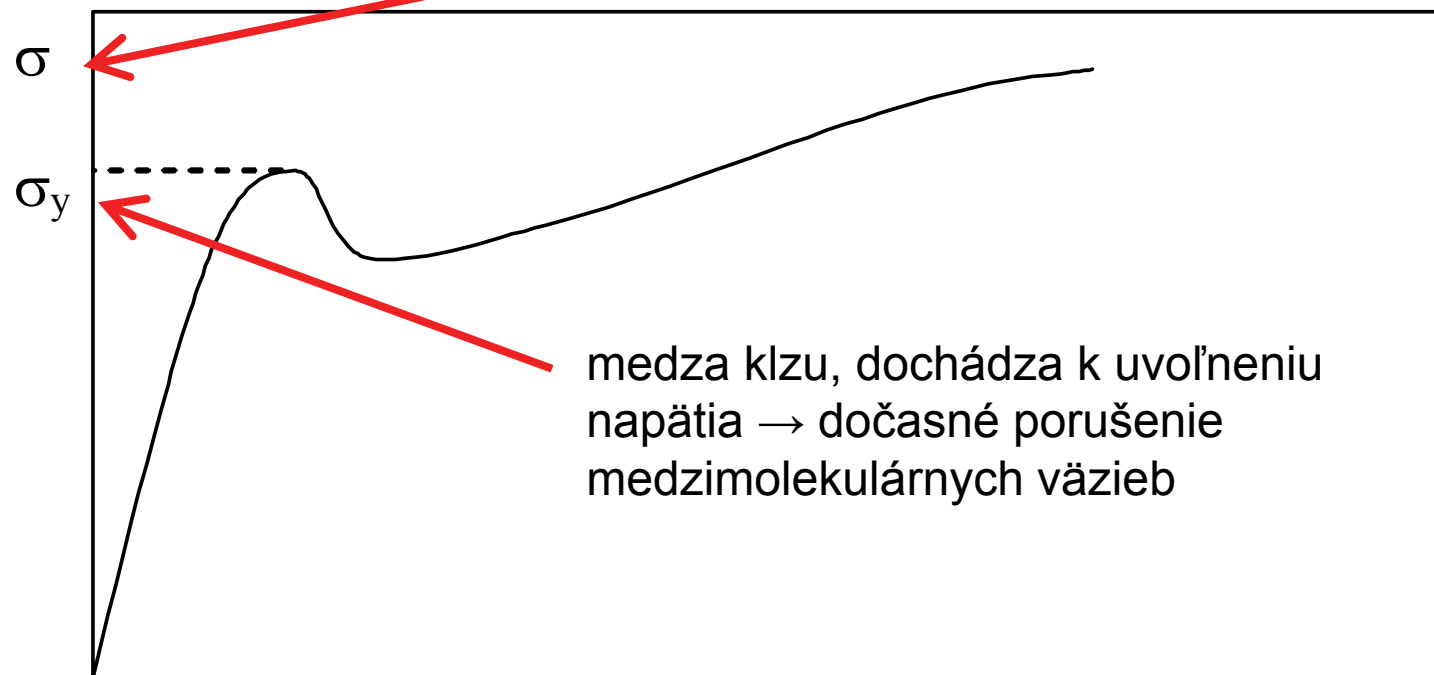
## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

### Sklené polyméry

- Veľké deformácie:

- ťahová skúška

pôsobiaci sila : pôvodný prierez

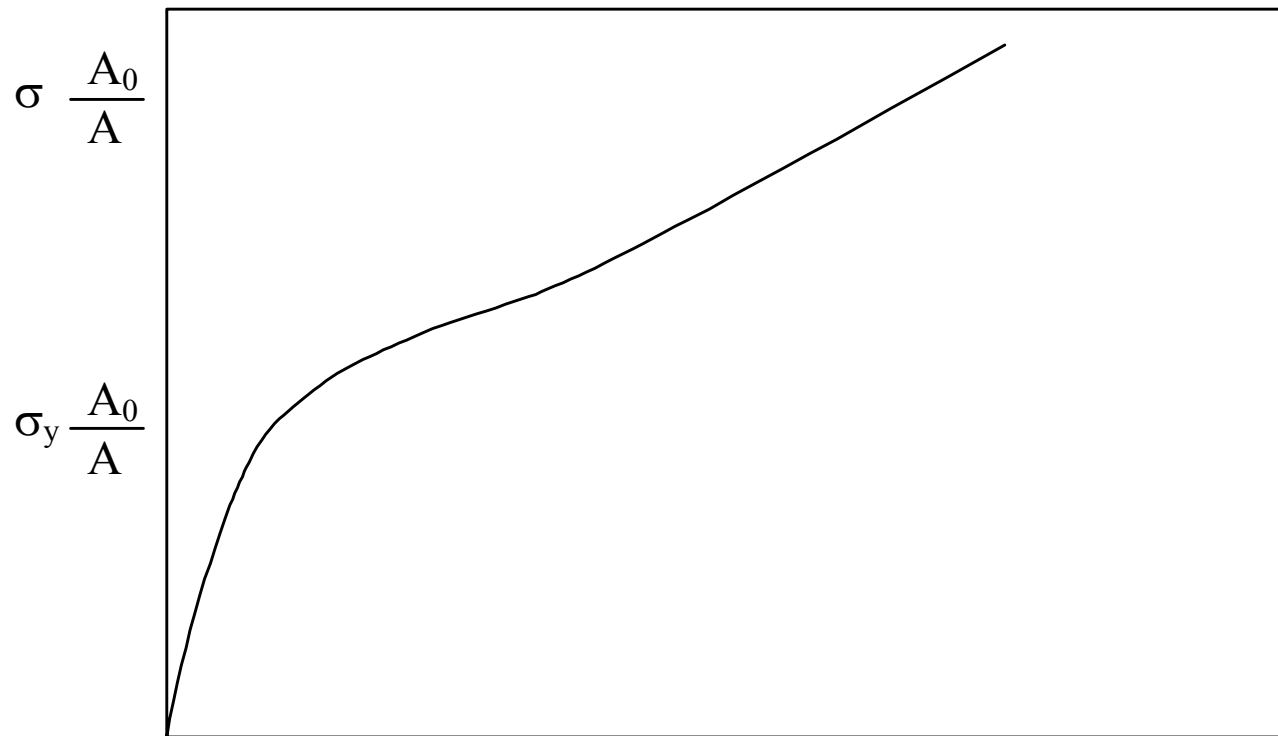


## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



### Sklené polyméry

- Veľké deformácie:
  - ťahová skúška pri zohľadnení zmeňujúceho sa prierezu



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



### Sklené polyméry

- Veľké deformácie:

$$\sigma_y = a + b \cdot \log \frac{de}{dt}$$

- a, b materiálové konštanty,  $a = f(T)$ ,  $b = f(T)$
- $de/dt$  rýchlosť deformácie



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



### Sklené polyméry

- Veľké deformácie:

Striebrenie → u sklených polymérov:

plastická deformácia v transparentných polyméroch je sprevádzaná vznikom malých strieborných oblastí (vzhľadom podobných trhline) pri ďalšom zaťažení z nich môžu vzniknúť trhliny ich vznik je ovplyvnený nečistotami (hlavne na povrchu)



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

### Sklené polyméry

- Veľké deformácie:

Striebrenie → u sklených polymérov:

ich vznik je ovplyvnený prítomnosťou kvapalín a plynov

pri nižšej teplote a väčšej rýchlosti ich vzniká väčšie množstvo

sú to oblasti diskovitého tvaru 10-1000 nm hrubé o priemere 0,1 - 10 mm

## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



Sklené polyméry

- Veľké deformácie:

Striebanie → u sklených polymérov:

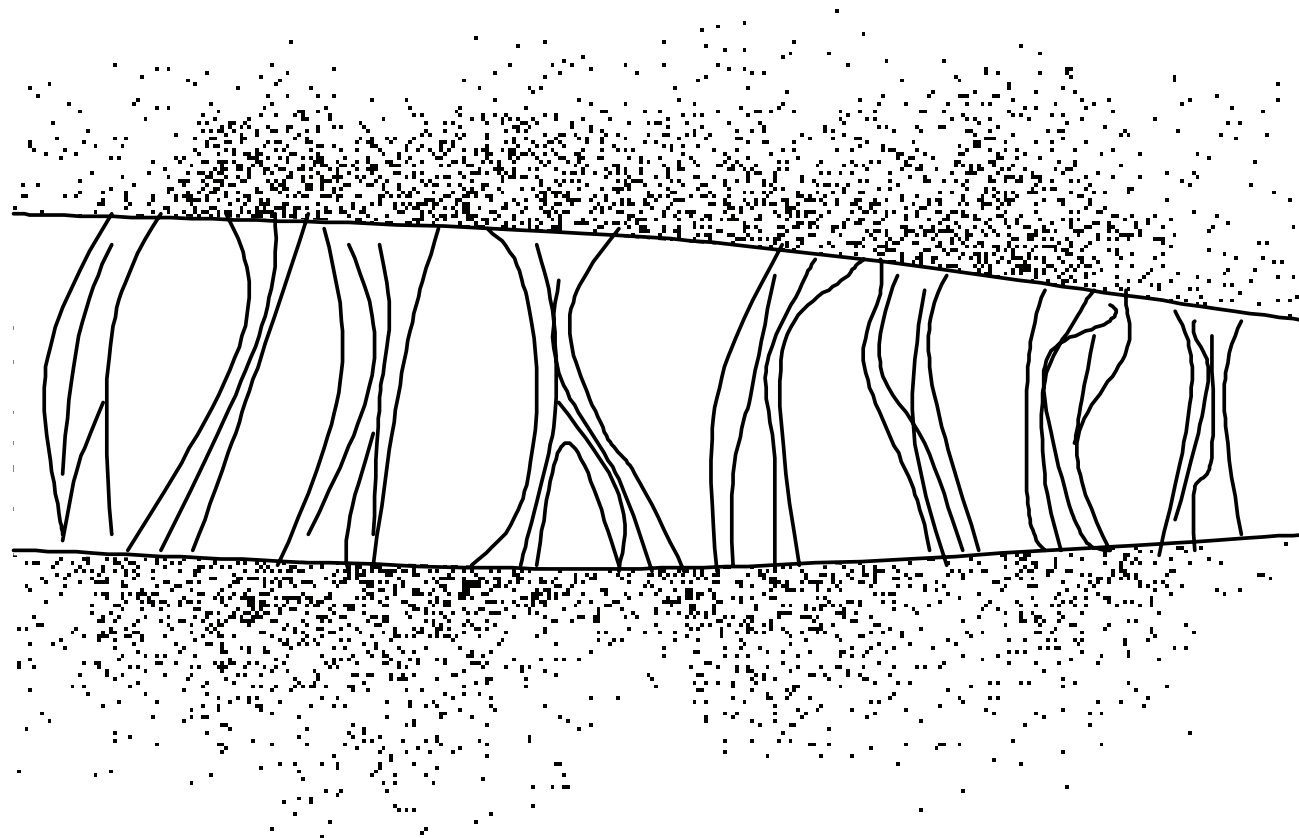
menšia hustota → menší index lomu → optické  
zviditeľnenie

## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



### Sklené polyméry

- Veľké deformácie: Striebrenie → u sklených polymérov:



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



### Kryštalické polyméry

- čisté kryštalické polyméry prakticky neexistujú, výsledné mechanické vlastnosti majú charakter ako amorfných plastov, tak čisto kryštalických látok

## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



### Kryštalické polyméry

- Malé deformácie:
  - amorfná fáza pod teplotou skleného prechodu → deformácie ako doteraz
  - amorfná fáza nad teplotou skleného prechodu → kaučuk (oveľa menší modul pružnosti)

Polyetylén: Youngov modul  $E \sim 1/(1-c)$

kde  $c$  je stupeň kryštalinity



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

### Kryštalické polyméry

- Malé deformácie:

kovalentná väzba pozdĺž reťazca

Van der Waalsova väzba  
kolmo k reťazcu

E [GPa]	kryštalická fáza	kryštalická fáza	vzorka polyméru
Polyetylén	240	4	~ 1,0
Polypropylén	42	3	~ 1,1

- Silná anizotropia!



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

### Kryštalické polyméry

- Veľké deformácie:
  - vplyv kryštalickej fázy reťazce sa môžu vyťahovať z lamiel. Medza klzu:

$$\sigma_y = A \cdot c + B$$

$c$  = stupeň kryštalinity,  $A$ ,  $B$  konštanty

- vznik strieborných plôch prevažne v amorfnej fáze a v menšom množstve, vlastnosti silne ovplyvnené nadmolekulárnou štruktúrou.

## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



### Elastomery

- Zosieťované elastomery (gumy, kaučuk...)
- Fyzikálne modifikované elastomery (kaučuk)
- Nezosieťované elastomery (fólie, tmely)

## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



### Elastomery - zosieťované elastomery

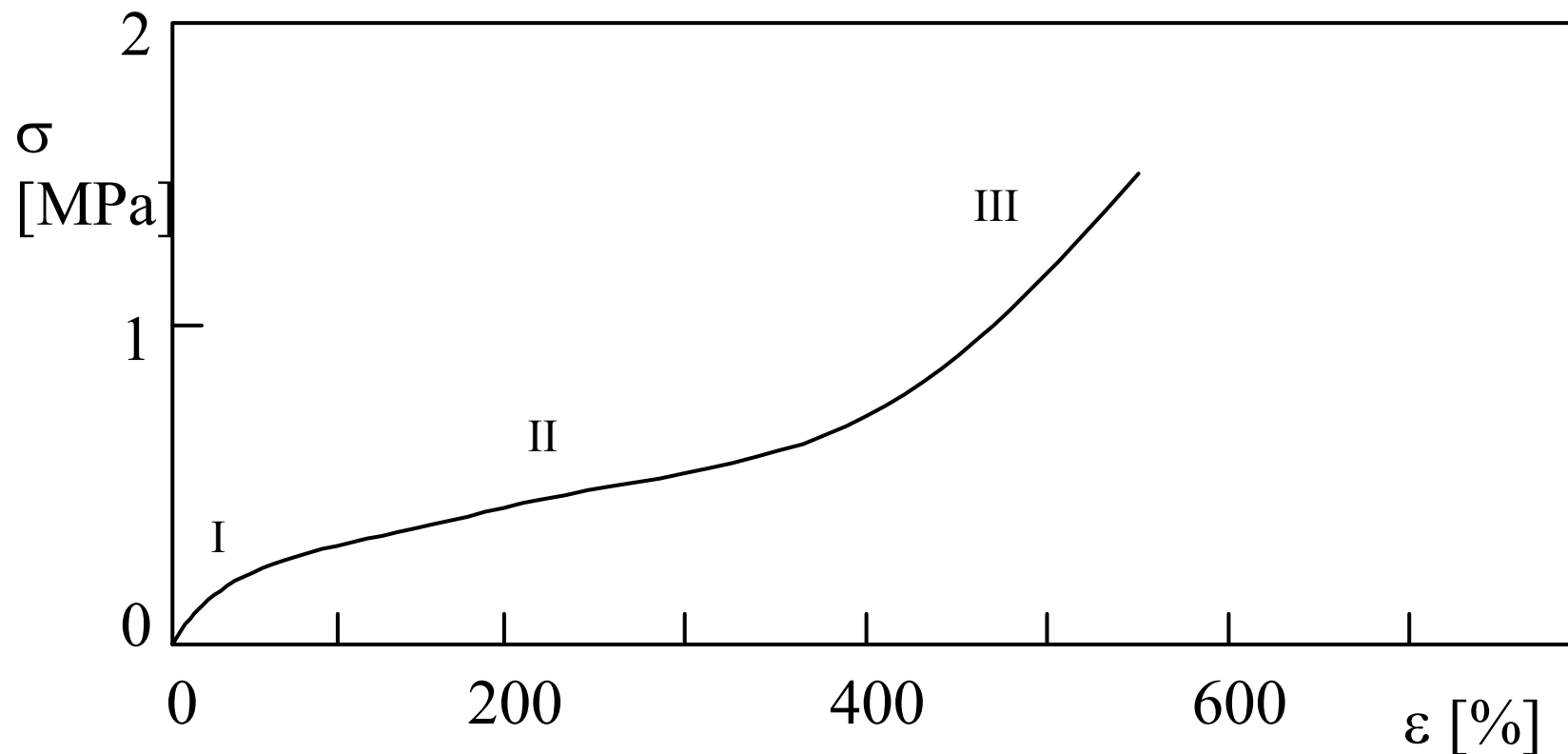
- guma, kaučuk
- ľahká deformovateľnosť, pružnosť
- navonok: viac homogénne v porovnaní s tuhými plastmi (mechanické vlastnosti)

## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



Elastomery - zosieťované elastomery

typická ťahová krivka:



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



Elastomery - zosieťované elastomery

typická ťahová krivka:

oblasť I: modul pružnosti v nábehovej časti: 1-10 MPa, pri dostatočne vysokých teplotách medzimolekulárne sily nie sú schopné zabrániť vzájomnému šmykovému posunu reťazcov po sebe





## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

Elastomery - zosieťované elastomery

typická ťahová krivka:

oblasť II: Poissonova konštanta = 0,5 (bežné anorg. mat., alebo tvrdé plasty: 0,3) → objem látky zostáva konštantný → nestlačiteľný materiál (ľahká deformovateľnosť v šmyku nedovolí vnútri vzorku vznik napätí, ktoré by upravili medziatómové vzdialenosti)

## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



Elastomery - zosieťované elastomery

typická ťahová krivka:

oblasť III: nárast deformačnej sily, obmedzená dĺžka reťazcov



## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

Elastomery - zosieťované elastomery

typická ťahová krivka:

Pri vysokých rýchlostiach deformácie (resp. pri nízkych teplotách) nestihnú polymérové reťazce zaujať všetky možné polohy, stúpa viskozita aj veľkosť napätia → deformujú sa medzimolekulárne aj vnútromolekulárne väzby

## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



Elastomery – fyzikálne modifikované elastomery

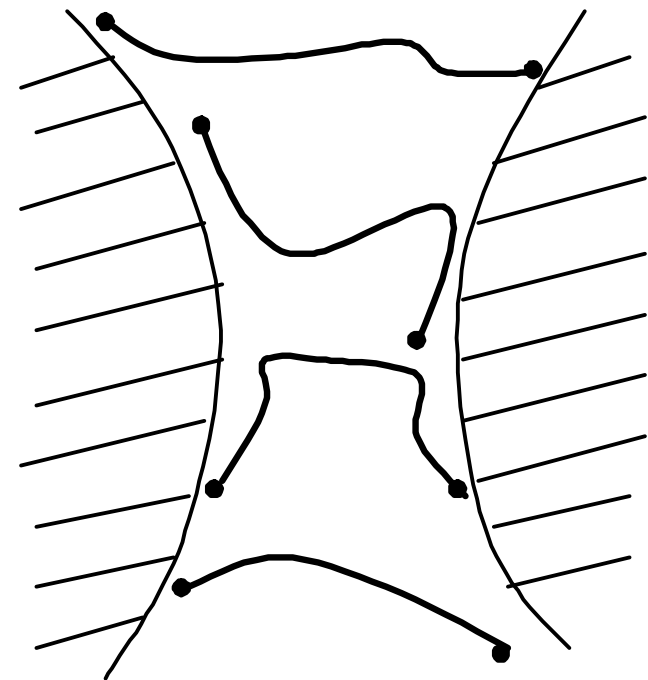
malé hodnoty modulu pružnosti → obmedzenie použitia.

zväčšenie hustoty použitia → zvýšenie tuhosti (zároveň aj vzrast teploty skleného prechodu)

## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

### Elastomery – fyzikálne modifikované elastomery

- kryštalizácia pozdĺžne natiahnutých reťazcov, kryštalické oblasti sa chovajú ako tuhé plnivo → zvýšenie modulu pružnosti (väčšinou vratný proces)
- u iných materiálov plnivá: sadze

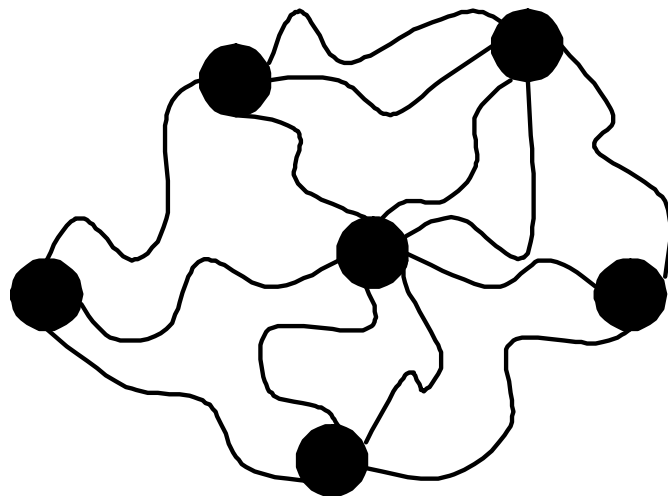


## 6.2 Základné mechanické vlastnosti



### Elastomery – fyzikálne modifikované elastomery

- fyzikálna väzba = spojenie dvoch blokov rôznych polymérov z ktorých jeden je pri danej teplote pod teplotou skleného prechodu a druhý nad ňou

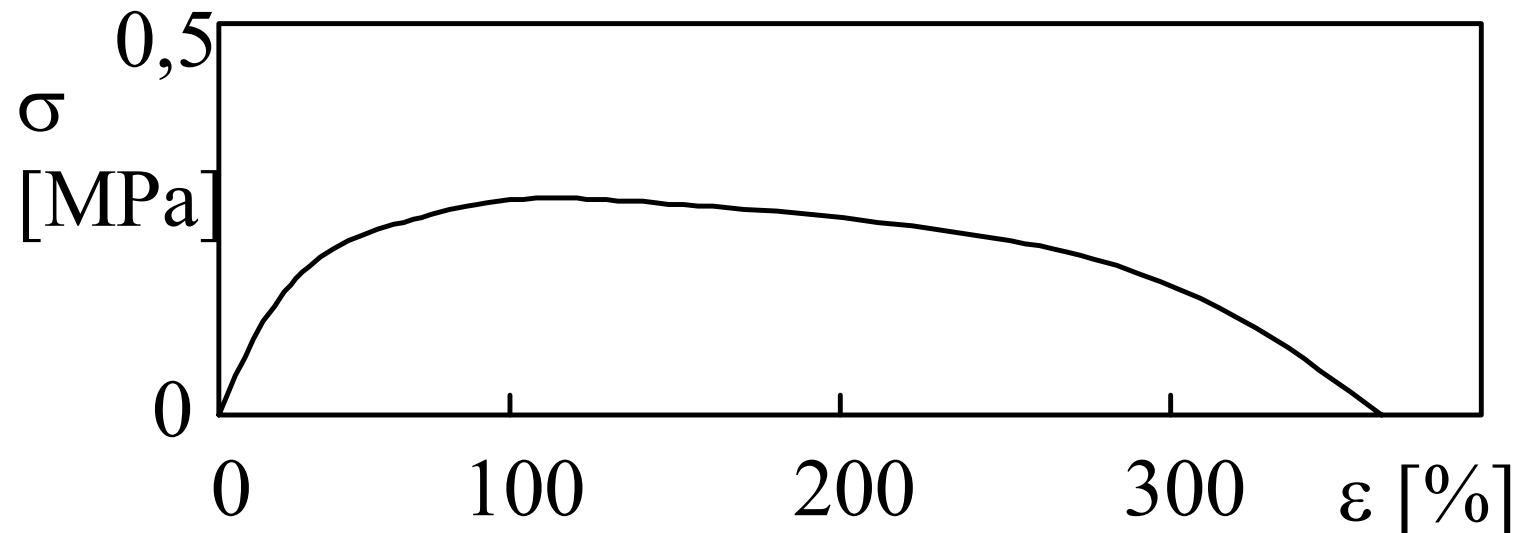




## 6.2 Základné mechanické vlastnosti

### Elastomery - nezosieťované elastomery

- veľká deformácia viskózneho typu
- použitie: ohybné fólie, tmely...





## 6.3 Medzné stavy

- Lom
- (Malé hodnoty modulu pružnosti + viskoelastické vlastnosti) → iné stavy ako lom
- Medzný stav → stav pri ktorom modelové teleso, vyrobené z daného materiálu a podrobené mechanickému namáhaniu, stráca schopnosť prenášať napätie, alebo keď jeho deformácia prekročí stanovený limit (porušenie = len strata schopnosti prenášať napätie)



## 6.3 Medzné stavy

$$F = \sigma \cdot S$$

F - sila pôsobiaca na teleso

$$F = \sigma \cdot V/L$$

$\sigma$  - napätie

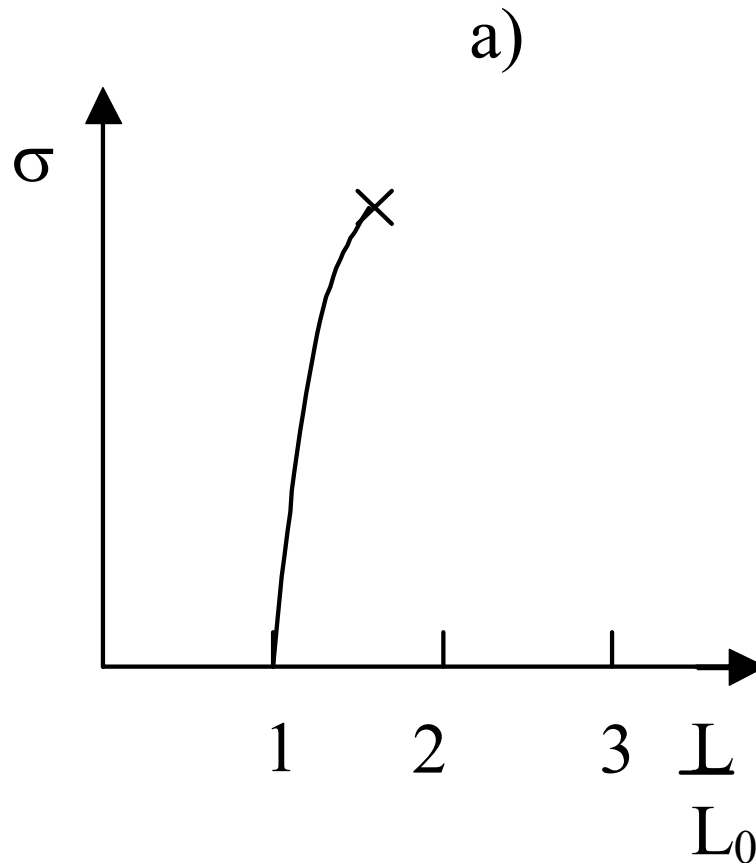
S - okamžitá plocha v priereze

V - objem

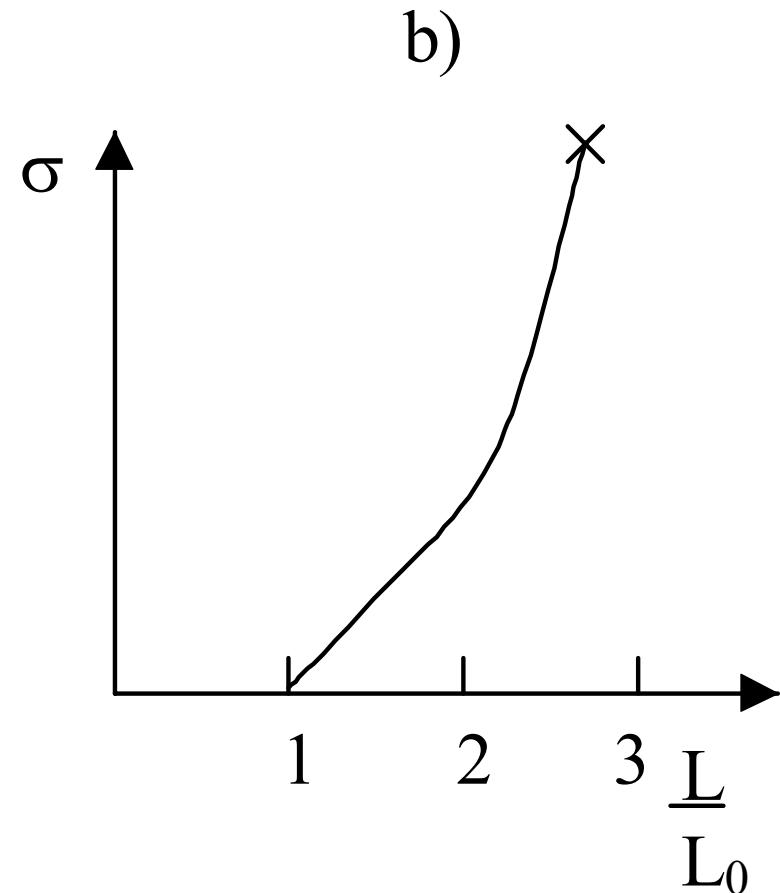
L - dĺžka

Predpoklad: objem sa pri deformácii nemení

## 6.3 Medzné stavy



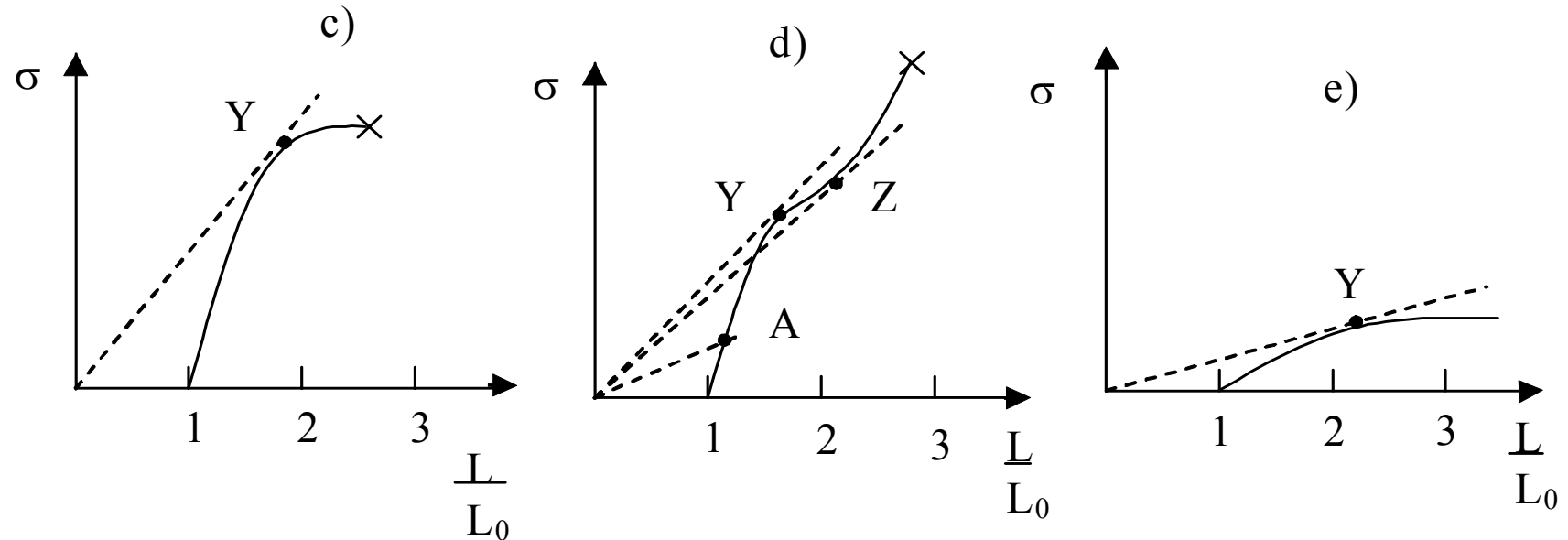
krehké plasty



zosieťované elastomery

dochádza k stálemu nárastu sil  $\rightarrow$  krehký (kvázikrehký) lom  
 teleso sa zužuje väčšinou po celej dĺžke, sila úmerná  $\tan \alpha$  sa stále zväčšuje

## 6.3 Medzné stavy



po dosiahnutí bodu Y (medza klzu) dochádza k poklesu celkovej sily. Reálna vzorka nemá všade rovnaký prierez  $\rightarrow$  v mieste najužšieho prierezu sa ďalej predlžuje a zužuje

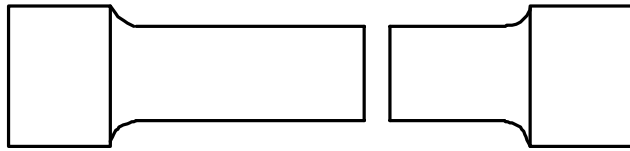
c  $\rightarrow$  končí tvárnym lomom

d  $\rightarrow$  proces tvorenia „krčku“ sa zastaví v bode Z, typické pre kryštalické materiály  
nasleduje krehký alebo aj tvárny lom

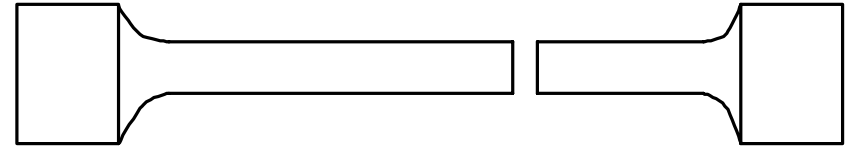
e  $\rightarrow$  nestabilita krčku sa nezastaví  $\rightarrow$  bodový lom (nezosieťované elastomery)

Faktory: teplota, rýchlosť deformácie, doba namáhania...

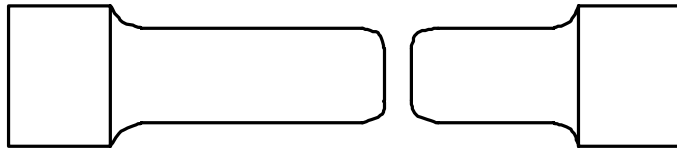
# 6.3 Medzné stavy



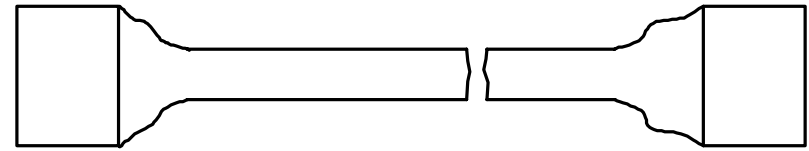
a)



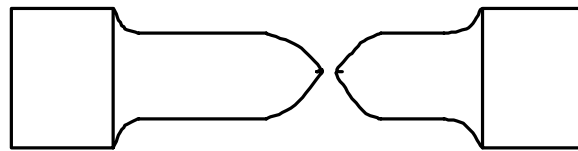
b)



c)



d)





## 6.3 Medzné stavy

### Krehký lom

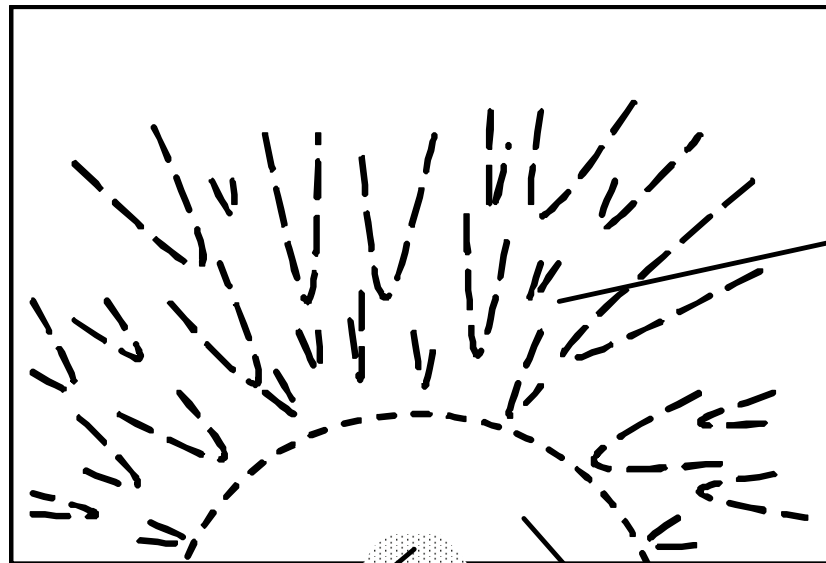


- Chýbajú rozsiahle plastické deformácie, resp. sú potlačené
- Hlavne pri zvýšenej rýchlosti namáhania a zníženej teplote (možné aj pri malých ale časovo dlho pôsobiacich napätiach)
- Jednotná teória → neexistuje

## 6.3 Medzné stavy Krehký lom



- Lomová plocha:



hrubá lomová plocha  
rýchly rast

zárodok  
lomu

hladká lomová plocha  
pomalý rast

## 6.3 Medzné stavy

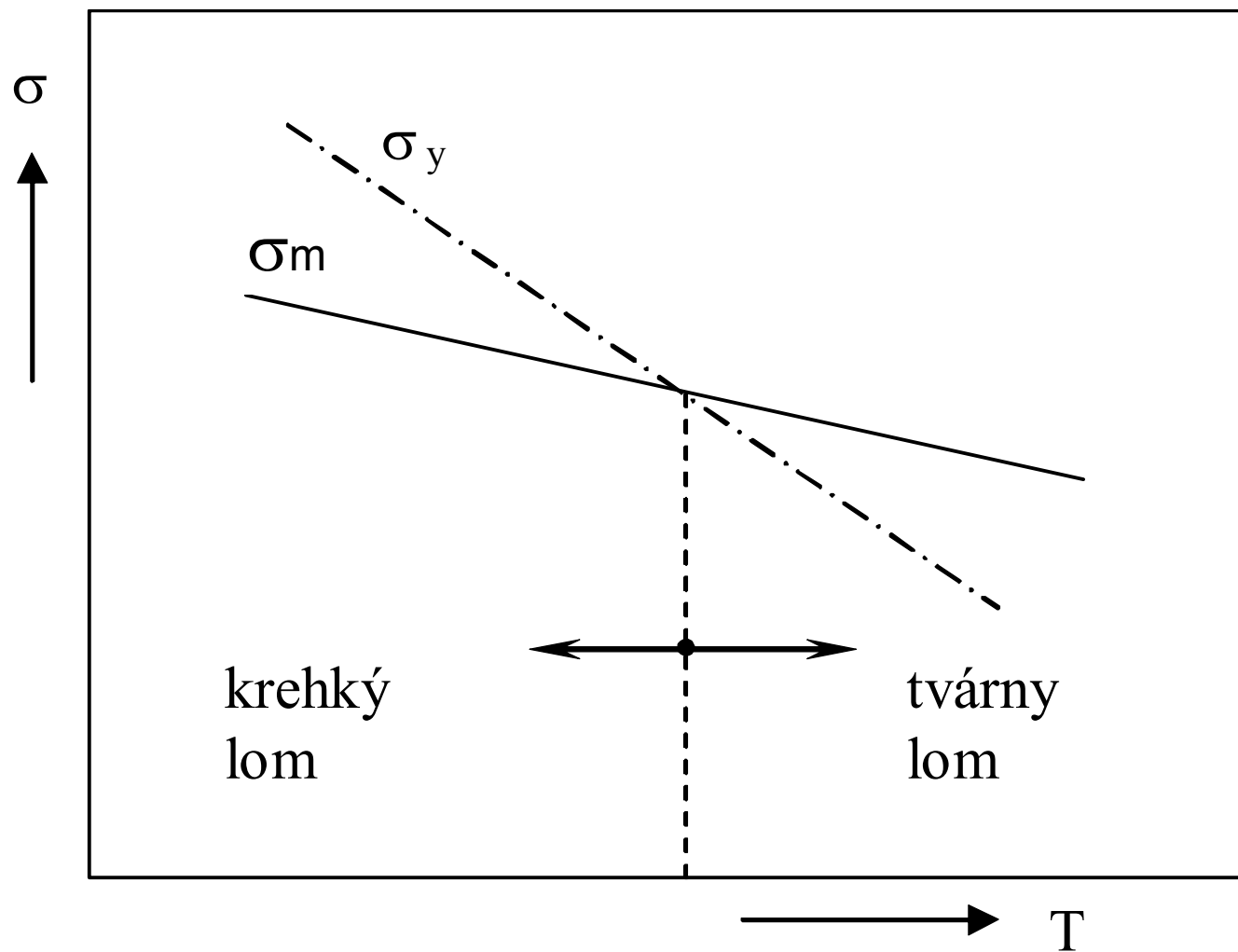
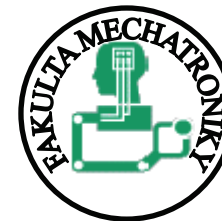
### Tvárný lom



- Rozsiahle plastické deformácie
- Výrazné zakrivenie (alebo aj pokles) ťahovej krivky
- Ludwig (1926) – teória, kedy nastane tvárny a kedy krehký lom na základe materiálových parametrov:
  - medza klzu  $\sigma_y$
  - medza pevnosti  $\sigma_m$

faktory: teplota, rýchlosť zaťažovania, doba zaťažovania, chemické pôsobenie, hrúbka vzorku a pod.

## 6.3 Medzné stavy Tvárny lom



## 6.3 Medzné stavy

### Únavový lom



- Zvýšenie teploty → strata mechanickej energie (transformuje sa na tepelnú)
- Fázy:
  - vznik trhlín (geometria telesa, technológia prípravy)
  - šírenie trhlín

## 6.3 Medzné stavy Creepový lom



- Predovšetkým: nesieťované plasty nad teplotou skleného prechodu.
- Chemické narušenie krehkých väzieb → nevratnosť procesov

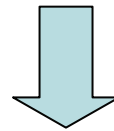




## 6.3 Medzné stavy

### Metódy zlepšenia lomových charakteristík

- Zaistenie tvárneho lomu
- Pri deformácii nesmie dochádzať k trhaniu polymérových reťazcov



- Zníženie medze klzu
- Zaistenie homogenity materiálu
- Potlačenie existencie mikrotrhlín, vrubov a ďalších koncentrátorov napätia
- Prísne dodržanie podmienok prevádzky (teplota,...)

# 7 Skúšanie materiálov



- Mechanické skúšky
  - Statické
  - Dynamickéalebo:
  - Nízke, obvyklé, vysoké teploty
- Technologické skúšky (a skúšky opotrebenia)

# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické



- Zaťaženie silou, ktorá sa pomaly a plynulo zvyšuje
- Zaznamenáva sa závislosť pôsobiacej sily a zmena rozmerov alebo tvaru telies.
- Skúška:
  - ťahom
  - strihom
  - tlakom
  - skúšky lomovej húževnatosti
  - ohybom
  - skúšky tvrdosti
  - krútením

# 7.1 Mechanické skúšky

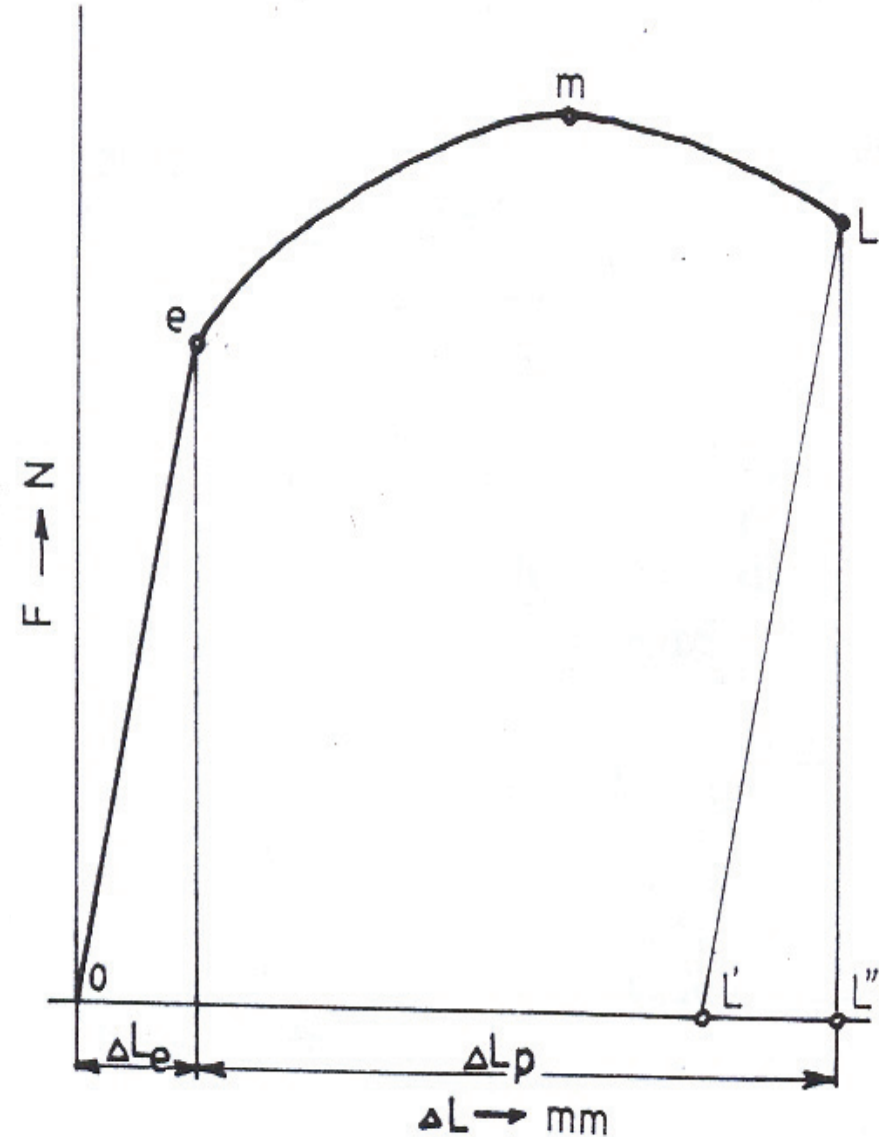
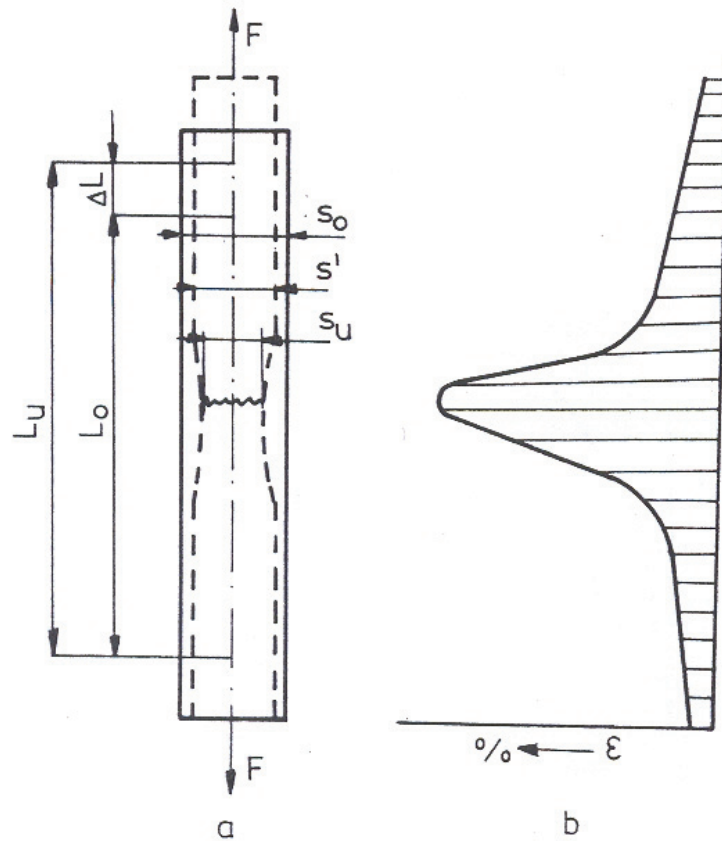
## Statické – Skúška ťahom



- Normalizovaná tyč
- Zaťaženie silou tak, aby vzniklo len jednoosové napätie
- Pri vzrastajúcej sile sa tyč predlžuje:
  - Najprv elasticky  $\Delta L_e$
  - Potom plasticky (bod e)  $\Delta L_p$
  - Celkové predĺženie je:  $\Delta L = \Delta L_e + \Delta L_p$

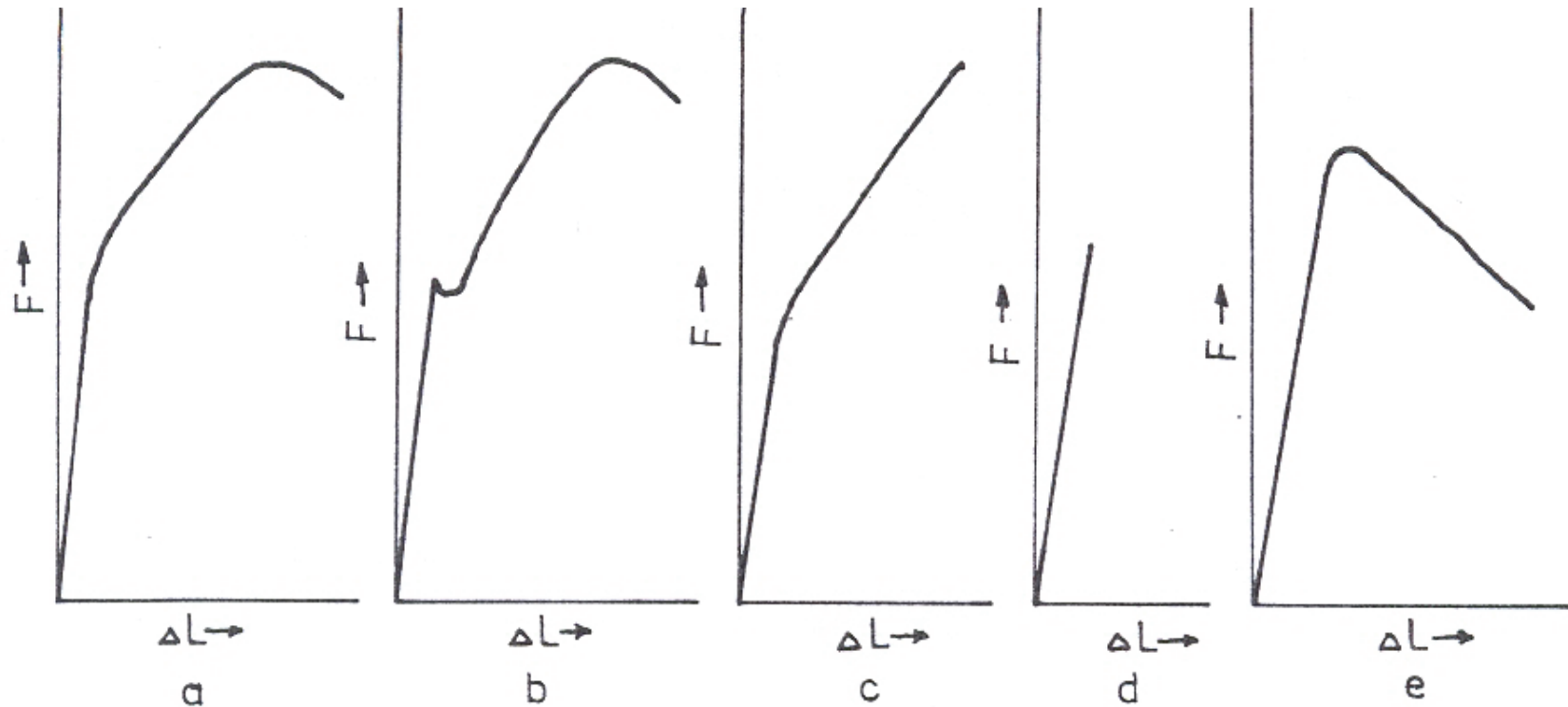
# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické – Skúška ťahom



# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické – Skúška ťahom

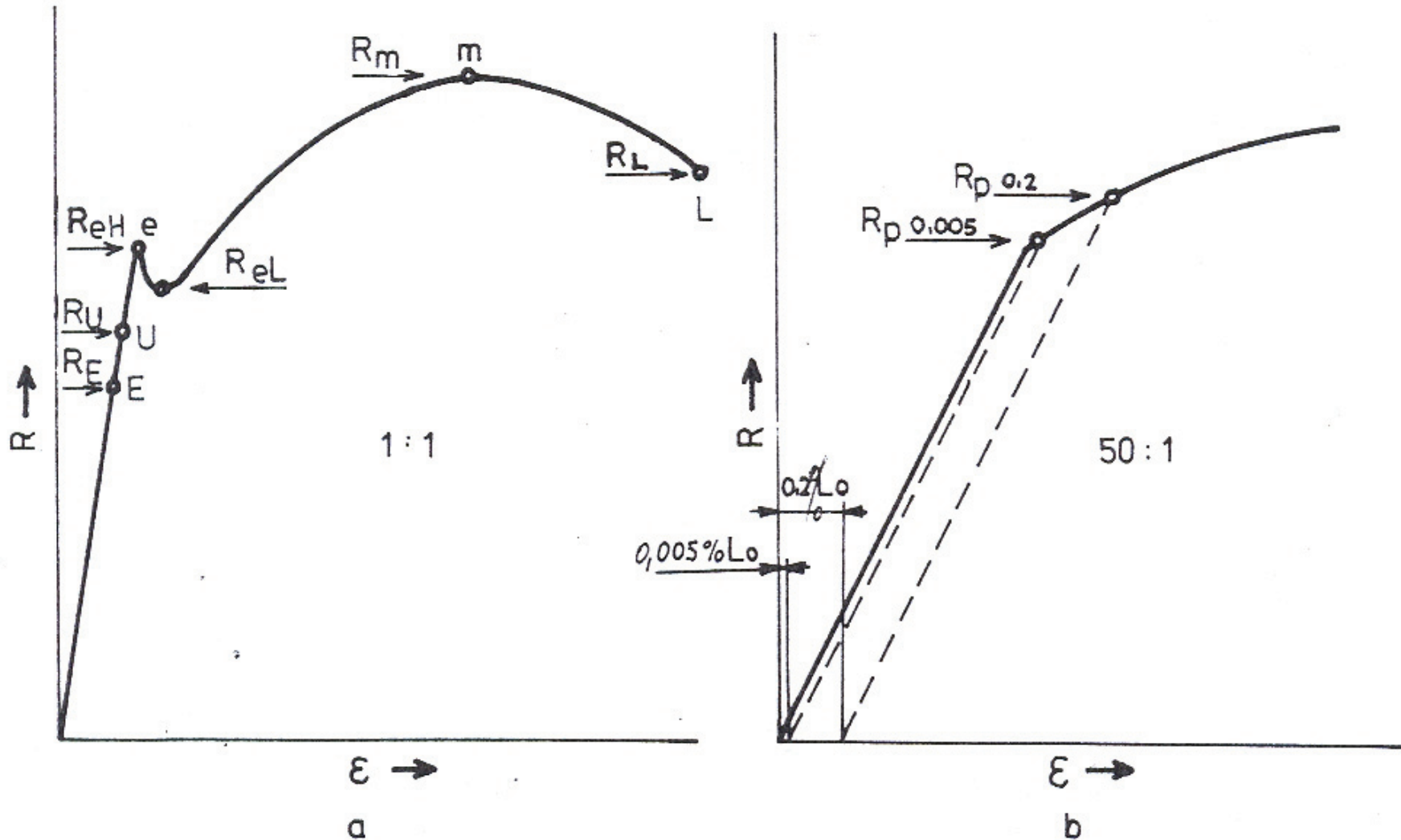


- a, kubická, plošne centrovaná mriežka (meď, nikel, hliník...),
- b, nízkouhlíkové ocele,
- c, intenzívne spevňovanie (niektoré ocele),
- d, krehké materiály,
- e, materiály rýchlo strácajúce schopnosť spevňovania (oceľ po starnutí)



# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické – Skúška ťahom



# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické – Skúška ťahom



- Medza pružnosti  $R_E$  – len elastická deformácia, alebo max. 0,005% plastickej defromácie (zmluvná medza pružnosti  $R_{P0,005}$ )
- Medza úmernosti  $R_U$  – do  $R_U$  platí  $R = E \cdot \varepsilon$  (Hookov zákon) dostatočne presne
- Medza klzu  $R_e$  – Napätie, pri ktorom sa ukazovateľ vzrastu pôsobiaceho zaťaženia zastaví, alebo poklesne (horná – dolná medza klzu), resp. napätie, ktorú spôsobí 0,2% predĺženie ( $R_{P0,2}$ )

# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické – Skúška ťahom



- Medza pevnosti  $R_M = F_{\max}/S_0$   
až do tohto bodu je deformácia pozdĺž tyče rovnomerná, potom sa lokalizuje do určitého objemu  
→ křčok

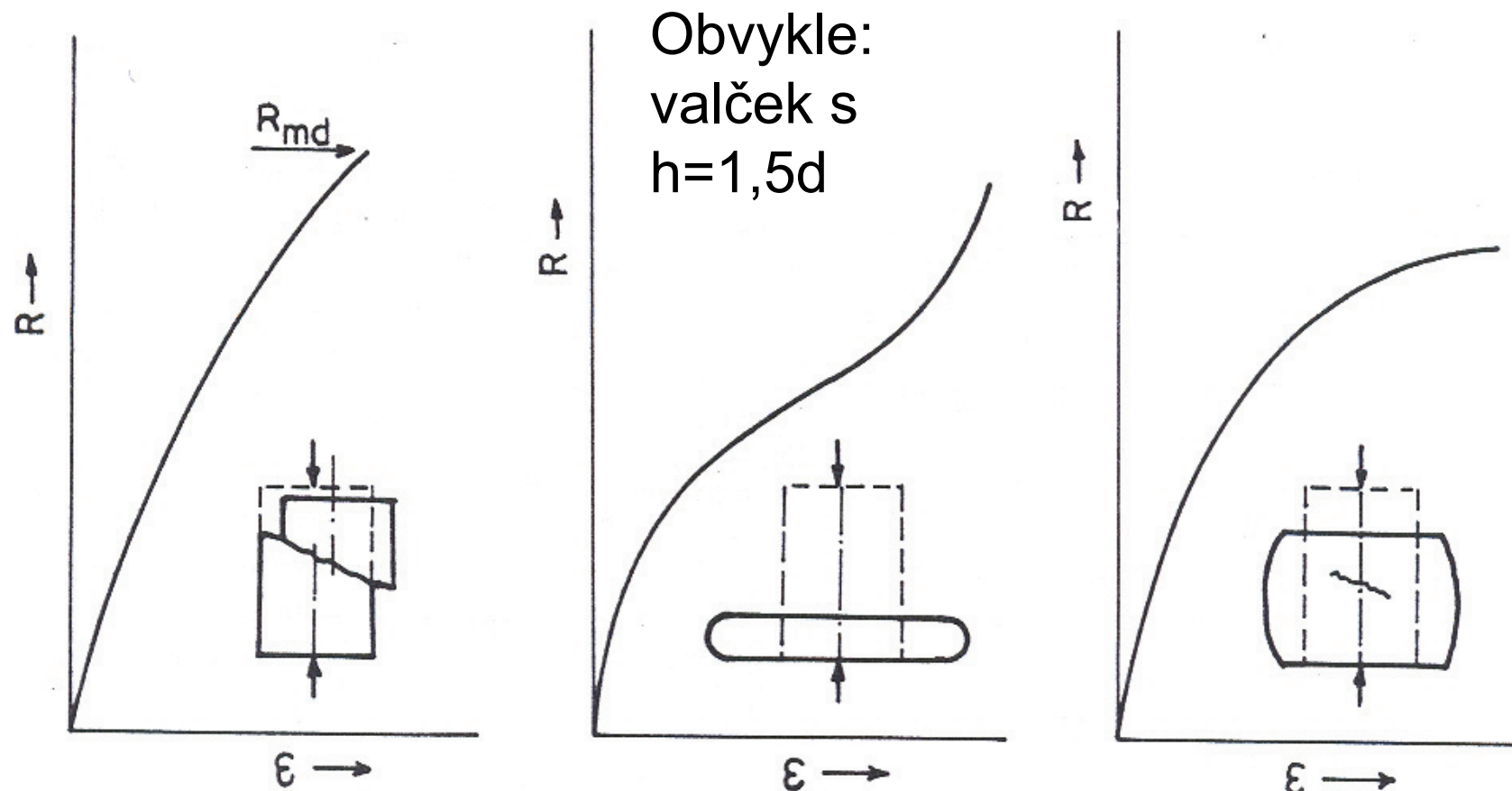
- ťažnosť materiálu A (pri roztrhnutí tyče):

$$A = \frac{L_V - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

podľa pomeru  $L_0 : d_0$  sa označuje:  
 $A_5$  ( $L_0 : d_0 = 5$ )  $A_{10}$  ( $L_0 : d_0 = 10$ )...

# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické - Skúška tlakom



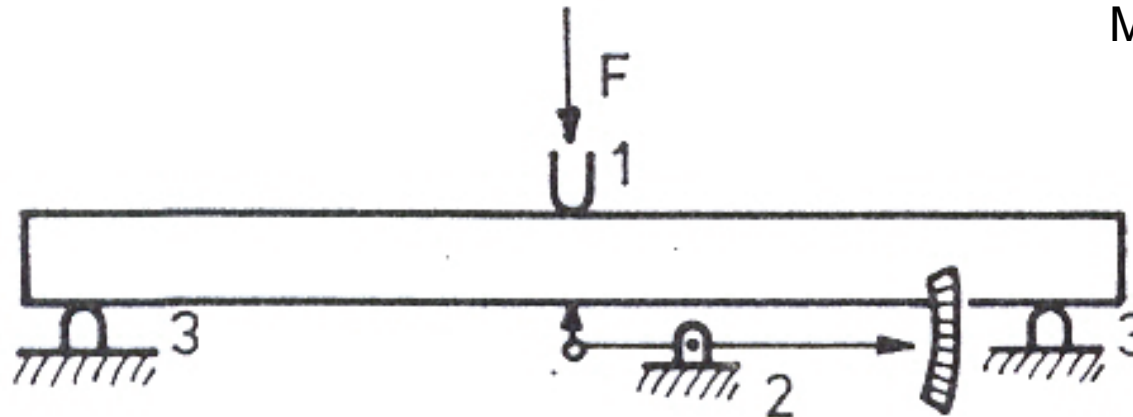
Diagramy skúšky tlakom a zmeny tvaru vzoriek po skúške

a - krehké materiály (napr. šedá liatina), b - dobre tvarovateľné materiály (napr. olovo), c - obvyklé materiály (napr. oceľ, kompozícia a pod.)



# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické - Skúška ohybom



Medza pevnosti pri ohybe:

$$R_{mo} = \frac{M_{o \max}}{W_o}$$

Pomerný prieťah:

$$y = \frac{Y}{l} \cdot 100\%$$

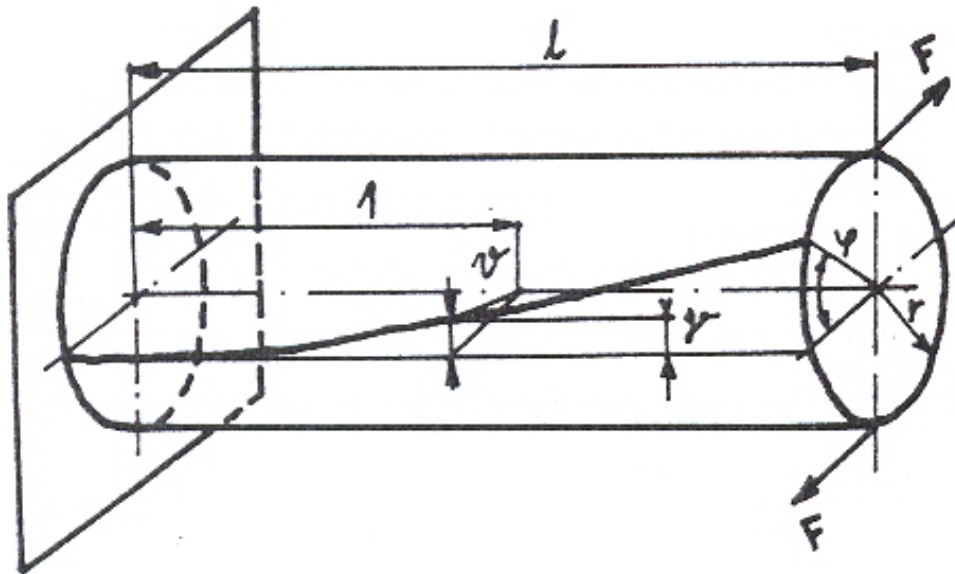
Skúška ohybom šedej liatiny

1 - zatažovací trň, 2 - zariadenie k meraniu prieťahu  $y$ , 3 - podpery



# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické - Skúška krútením



Pevnosti pri krútení:

$$\tau_{pk} = \frac{M_k}{W_k}$$

$$M_k = 2Fr$$

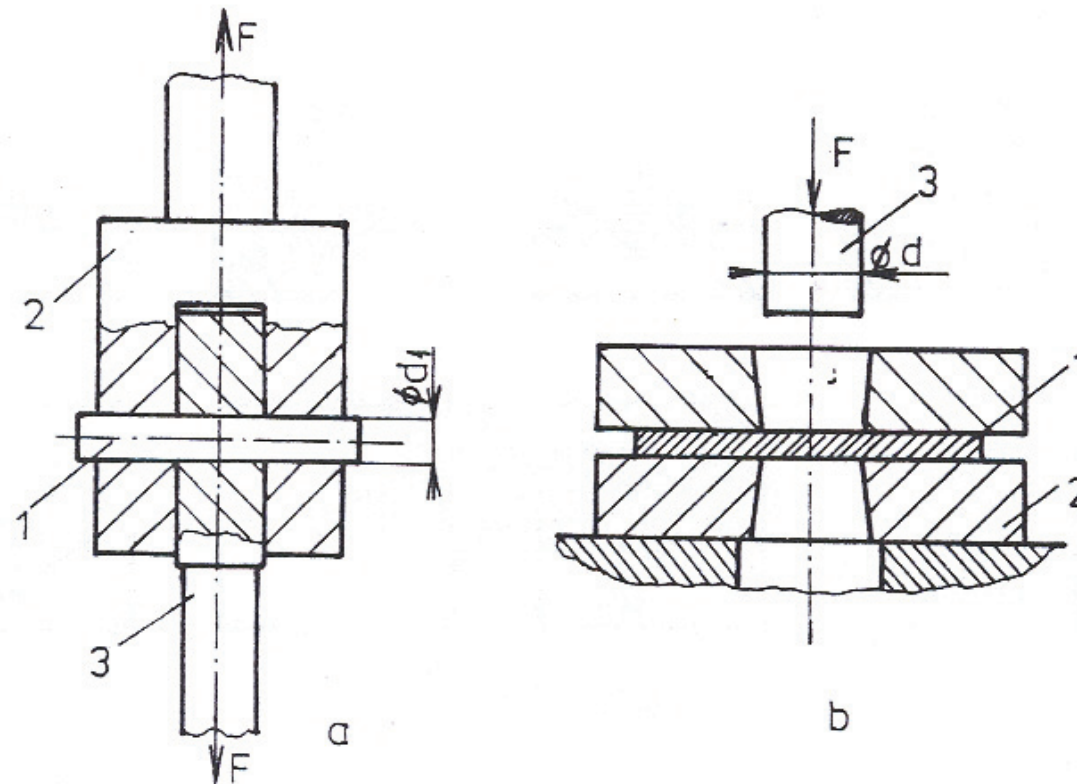
Pomerné skrútenie:

$$\gamma = \frac{\varphi}{l} \cdot 100\%$$



# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické - Skúška strihom

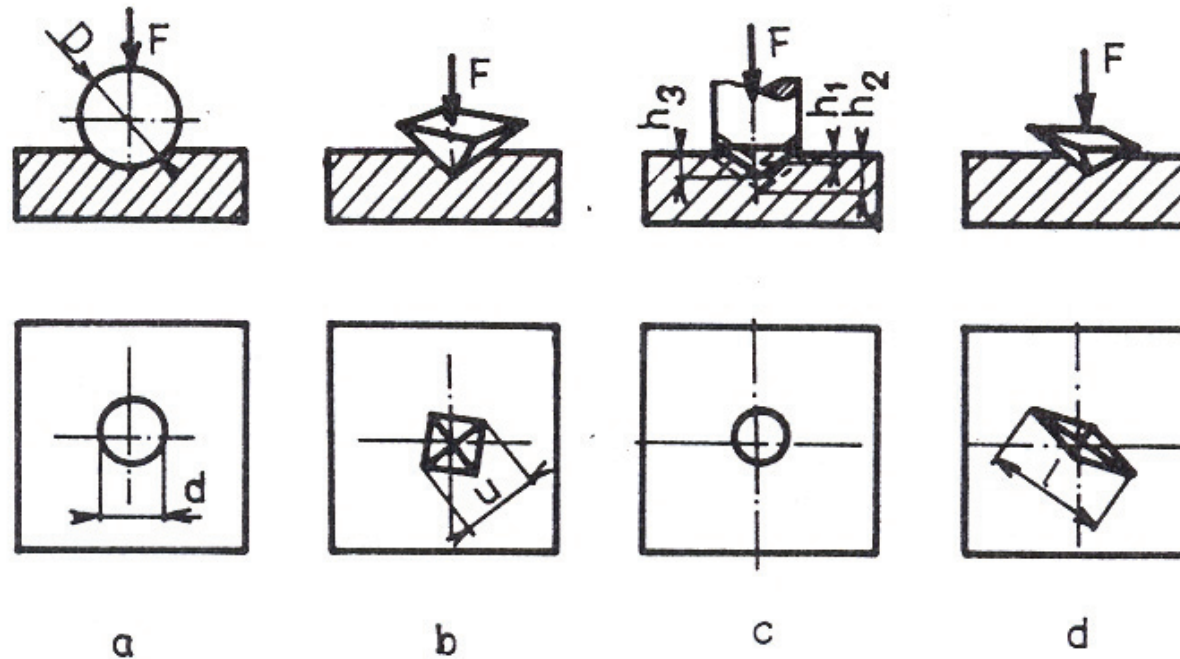


Skúška strihom

- a) zariadenie pre skúšku tyčí kruhového prierezu: 1 skúšobná tyč, 2 - vidlica, 3 - tiahlo s okom; b) zariadenie pre skúšku plechu: 1 - skúšaný plech, 2 - strižnica, 3 - strižník

# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické - Skúšky tvrdosti



Schematické znázornenie základných skúšok tvrdosti (horné obrázky) a tvar, prípadne dôležité rozmery vtlačkov (spodné obrázky) pre skúšku  
 a - podľa Brinella, b - podľa Vickersa, c - podľa Rockwella, d - podľa Knoop

# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické - Skúšky tvrdosti



Brinell:

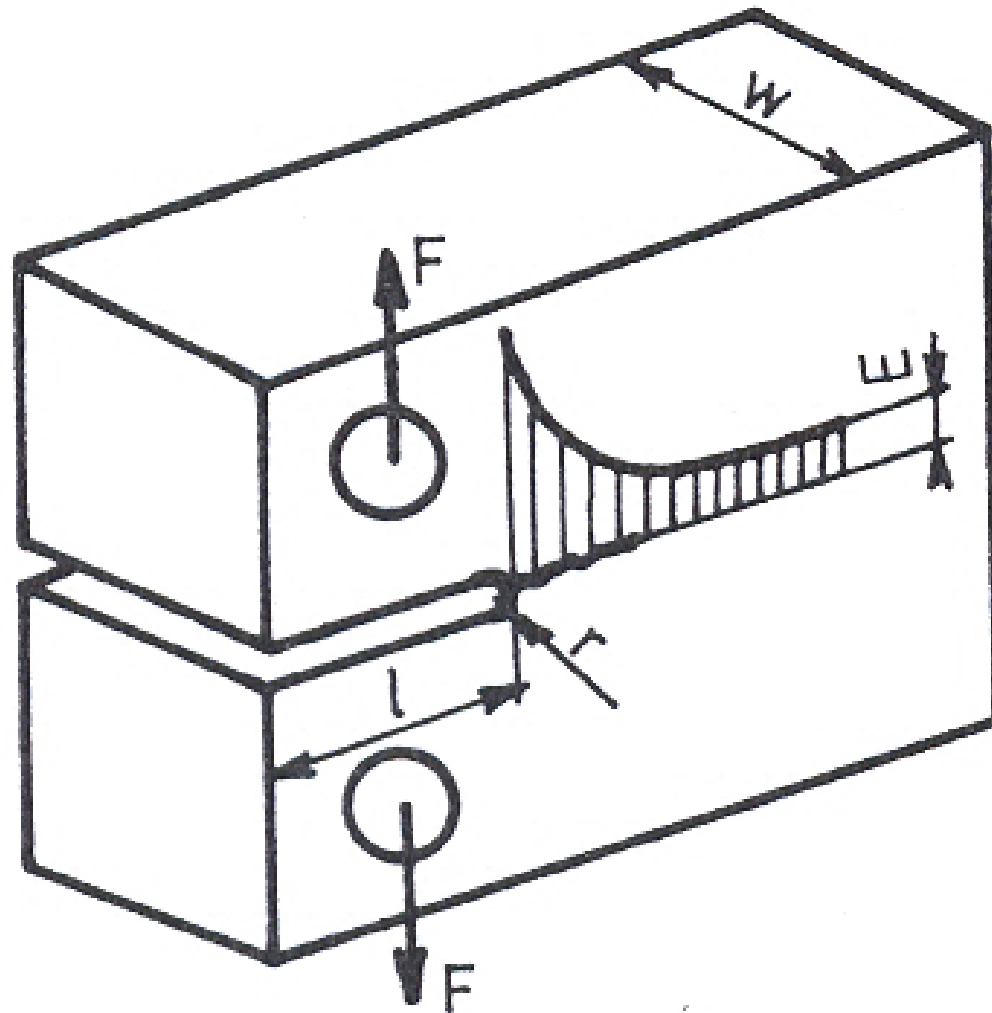
$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Vickers:

$$HV = \frac{F}{S} = 1,854 \frac{F}{u^2}$$

# 7.1 Mechanické skúšky

## Statické – Sk. lomovej húževnatosti



# 7.1 Mechanické skúšky

## Dynamické



Skúška ohybom

Skúšky: krútením, ťah, tlak...

Únavové skúšky



# 7.1 Mechanické skúšky

## Dynamické



## Skúška ohybom

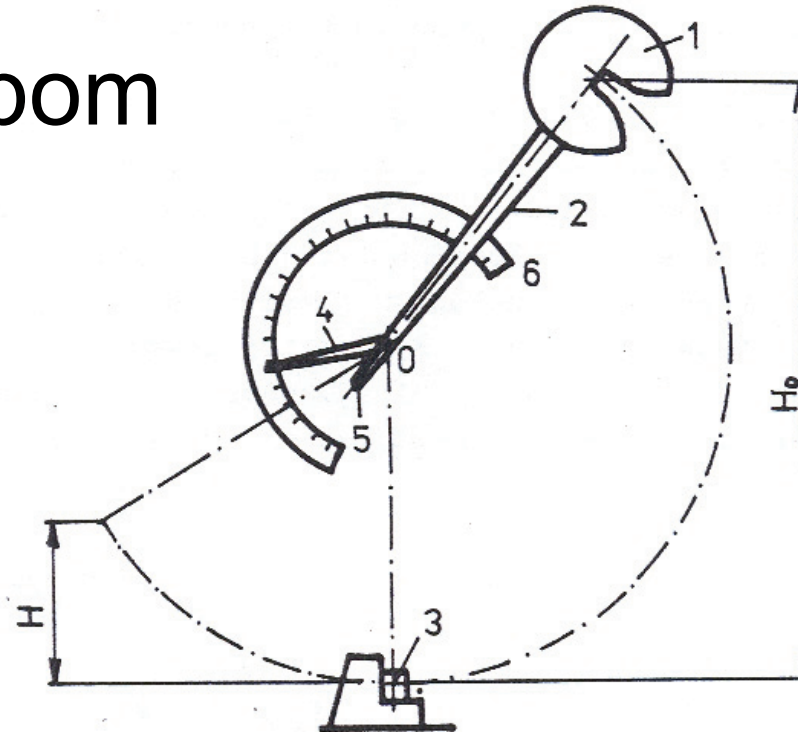


Schéma Charpyho kladiva

0 - otočná os, 1 - kladivo, 2 - kyvadlová páka, 3 - skúšaná vzorka, 4 - rúčka,  
5 - unášač na predĺženom konci páky, 6 - stupnica pre určenie spotrebovanej práce

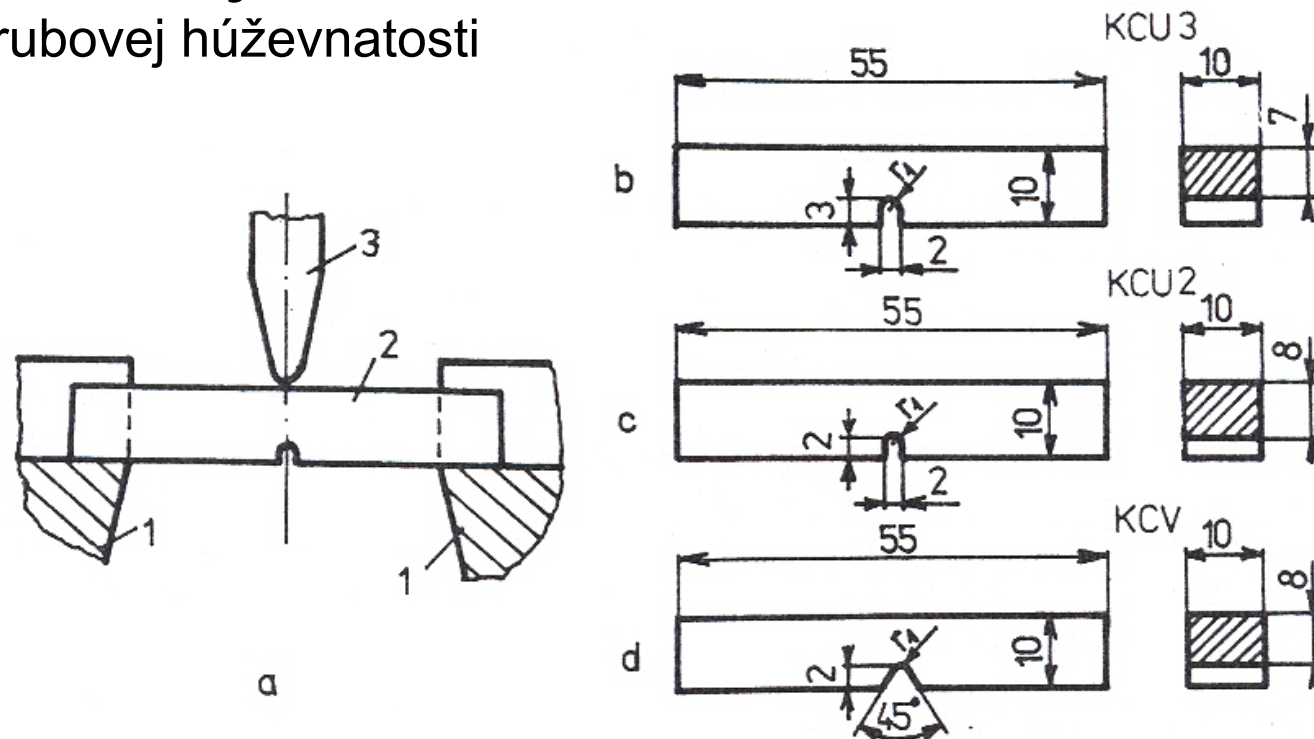


# 7.1 Mechanické skúšky

## Dynamické

### Skúška ohybom

Skúška vrubovej húževnatosti



Obr. 4.15

Schéma skúšky vrubovej húževnatosti - a (1 - podpery, 2 - skúšobná vzorka, 3 - hrot kladiva) a znázornenie skúšobných telies

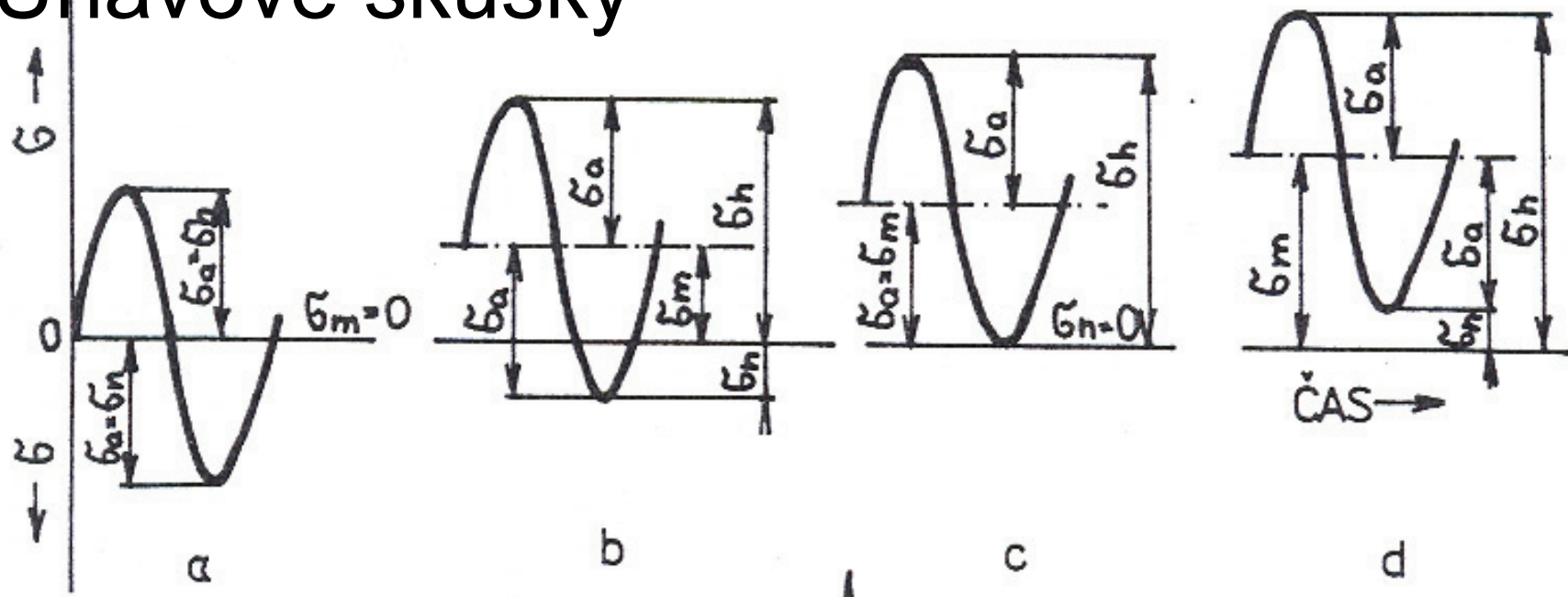
b - ČSN 42 0381.2, c - ČSN 42 0381.1 (Mesnager), d - ČSN 42 0381.5 (Charpy)

# 7.1 Mechanické skúšky

## Dynamické



### Únavové skúšky



- a, súmerný cyklus,
- b, nesúmerný cyklus,
- c, miznúci cyklus,
- d, pulzujúci cyklus.

## 7.2 Technologické skúšky a skúšky opotrebenia



- Skúška zvariteľnosti** zaručená, zaručená podmienená,  
dobrá, obtiažna
- Skúšky drôtov a lán** skúška striedavým ohybom,  
krútením, navíjaním
- Skúšky plechov** Erichsen, Kališteková skúška, skúšky lámavosti
- Skúšky rúr** rozháňanie, stlačenie,...
- Skúšky opotrebenia** klzné, valivé, abrazívne, erozívne,  
prechod prúdu, prietok vody...
- a pod.** kapilárne skúšky, ultrazvuk, mikroskopia...