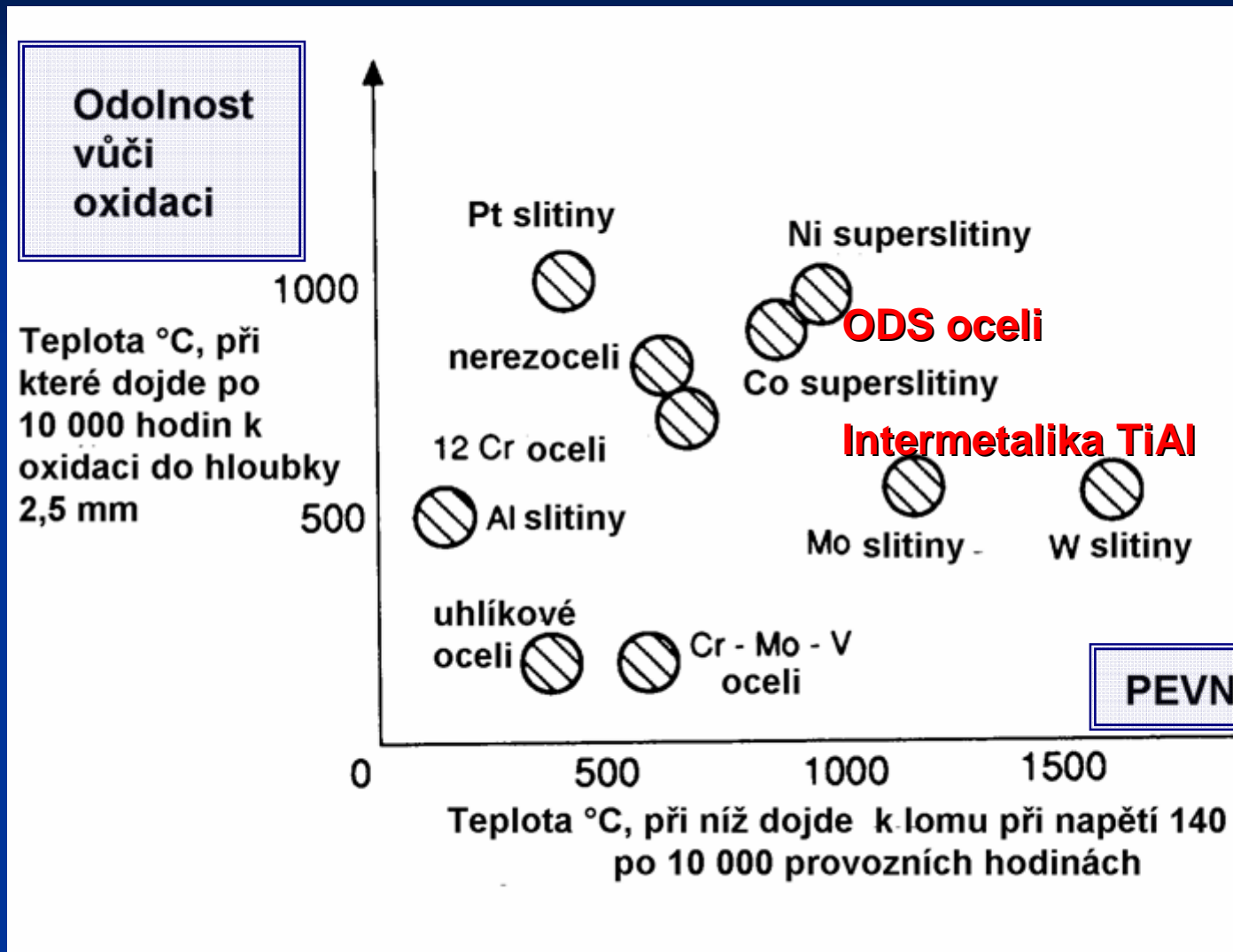


Creep (kríp) – tečení

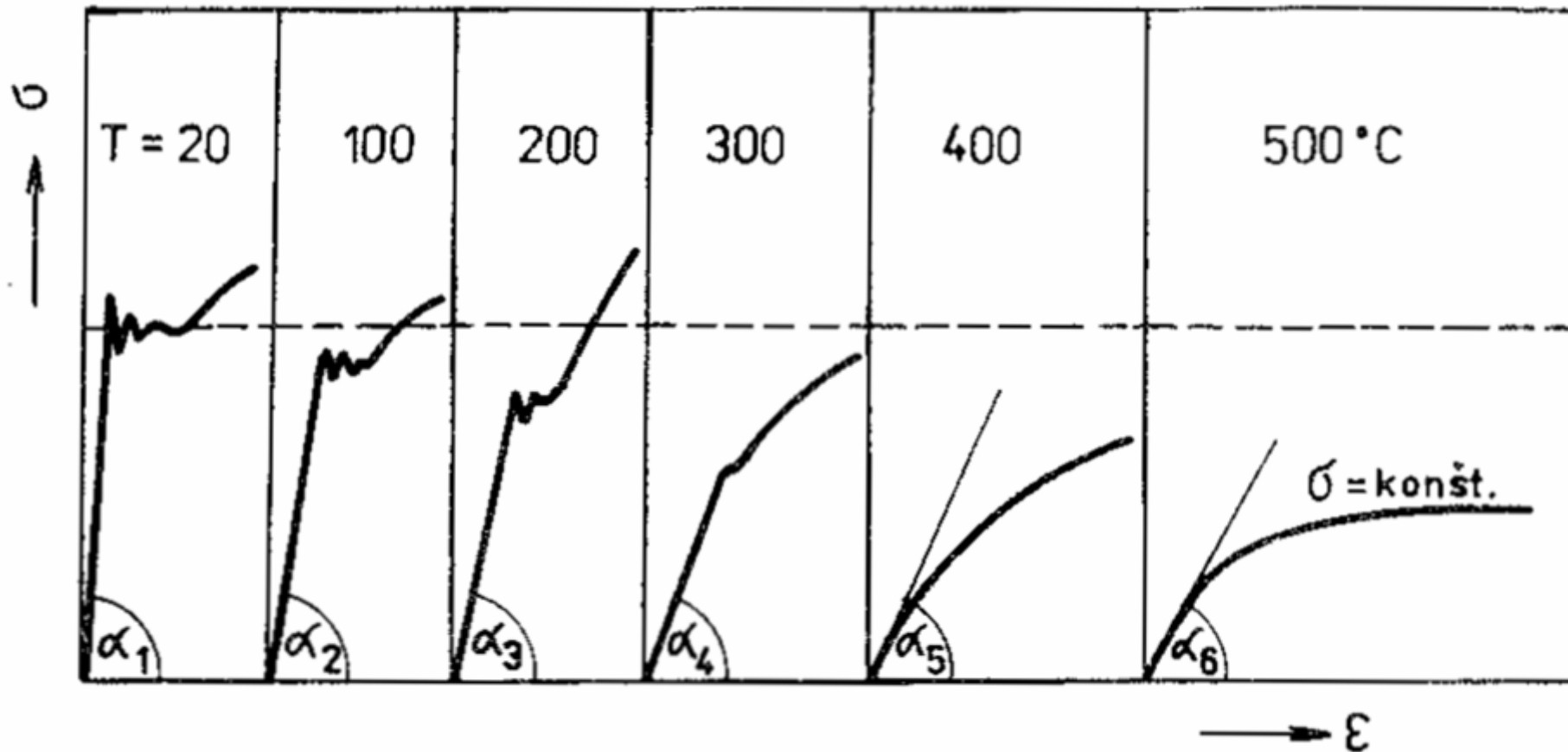
- i. Vliv zvýšených teplot na vlastnosti ocelí
- ii. Zkoušení creepového chování
- iii. Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu
- iv. Deformace a lom při creepu
- v. Parametry ekvivalence teploty a času
- vi. Spolupráce materiálového inženýra a konstruktéra při vývoji lopatek turbíny tryskového letadla

Vliv zvýšených teplot na vlastnosti materiálů



Vliv teploty na tahový diagram oceli

Nízkouhlíková ocel



Vliv teploty na tahový diagram oceli

Nízkouhlíková ocel

■ do 350°C

- postupně mizí výrazná mez kluzu
- hodnota R_e klesá
- deformace pohybem dislokací

■ nad 350°C

- zaniká výrazná mez kluzu
- tvar tahového diagramu výrazně ovlivňuje jak teplota, tak i rychlost zatěžování
- deformace difusí atomů – dochází k jevu označovanému jako **tečení - creep**

Creep - pomalá plastická deformace materiálu vyvolaná dlouhodobým působením **teploty a času**.

Deformace

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = f(\sigma)$$

Creep

$$\varepsilon_{pl} = f(\sigma, T, t)$$

Homologická teplota

$$\frac{\text{provozní teplota [K]}}{\text{teplota tavení [K]}}$$

Creep je významný za teplot $>(0,3 \text{ až } 0,5)$

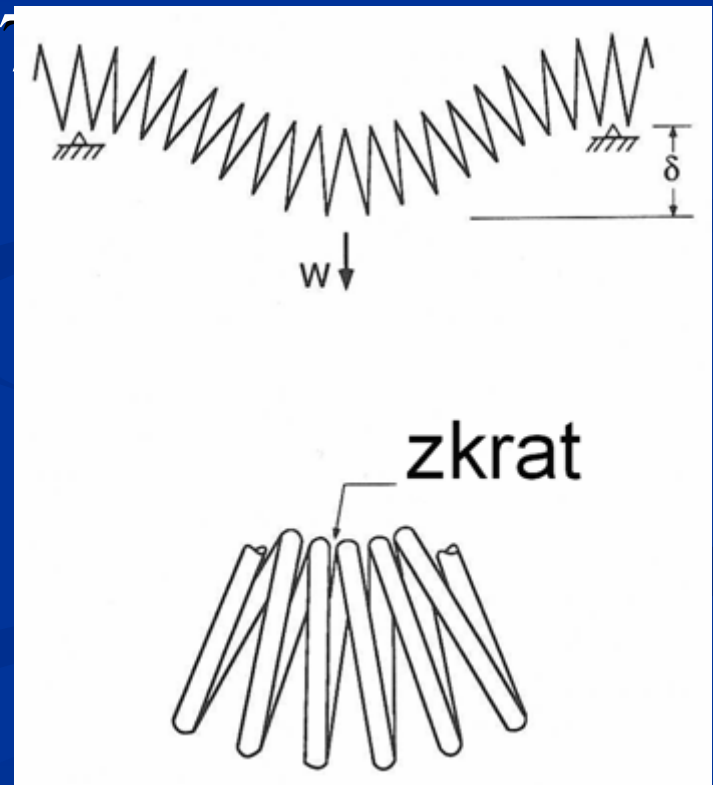
Výjimka niklové superslitiny $\approx 0,7$

Uhlíková ocel $\approx 350^{\circ}\text{C}$

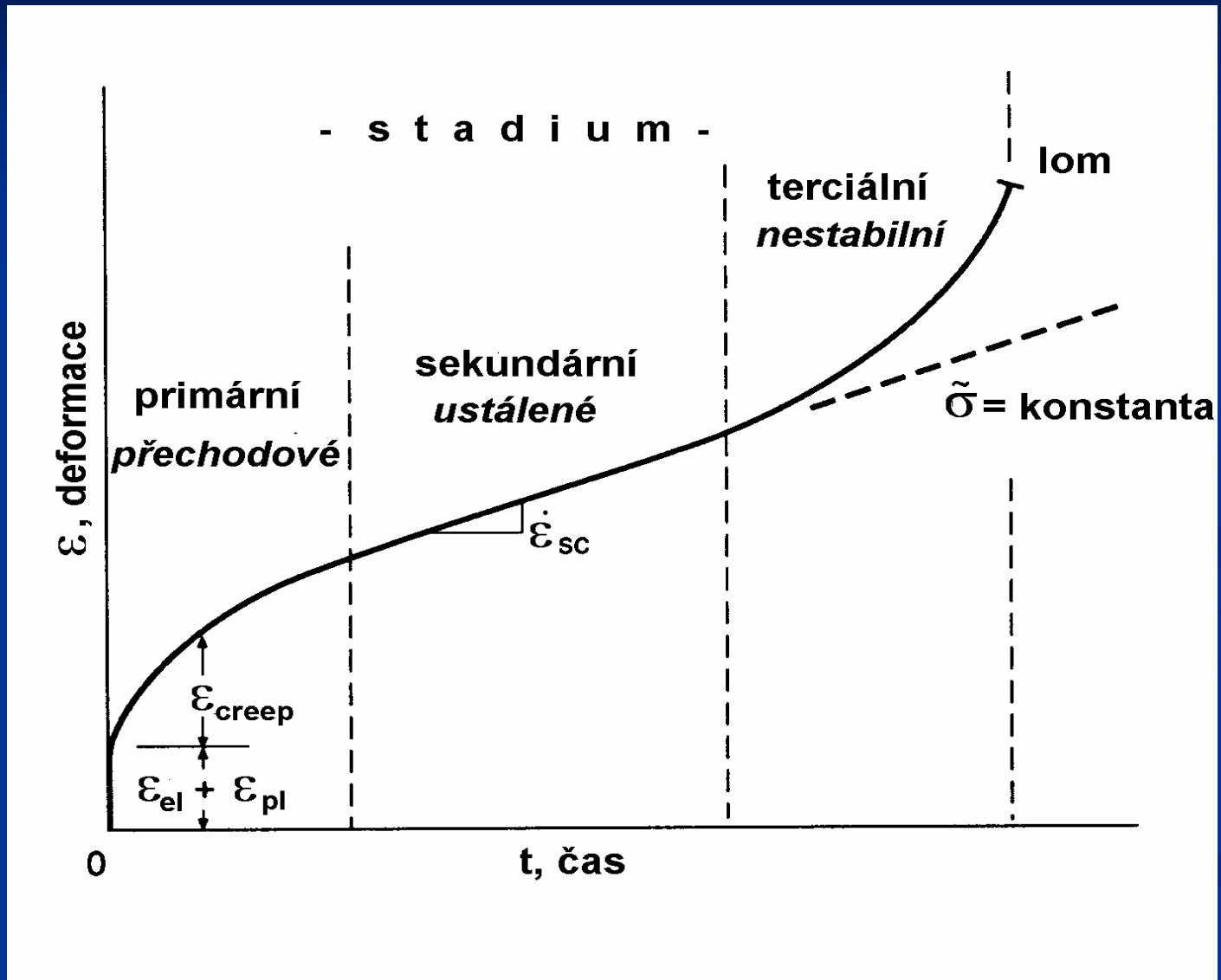
Parní turbína $\approx 550^{\circ}\text{C}$ (P91 $\approx 610^{\circ}\text{C}$)

Turbodmychadlo $\approx 850^{\circ}\text{C}$

Vlákno žárovky $\approx 2\,000^{\circ}\text{C}$



Co to je creep



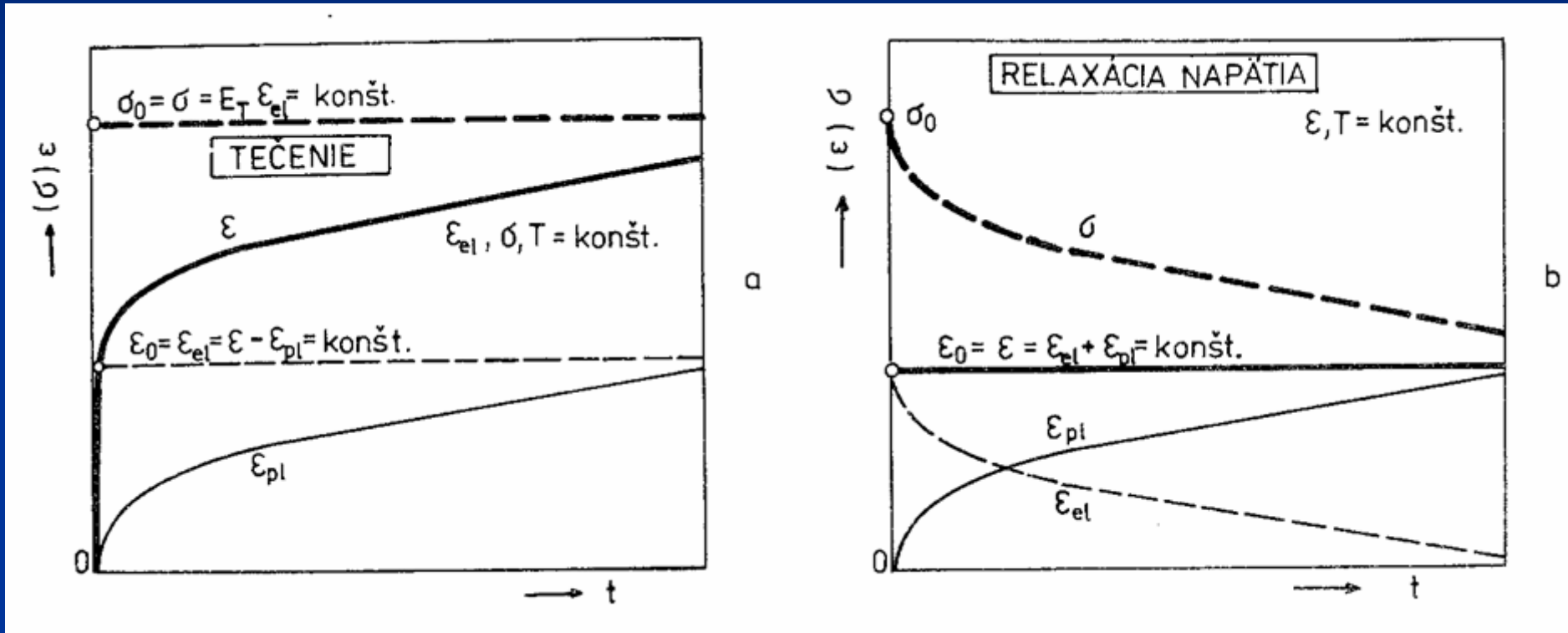
Zkoušky creepového chování

předpokládaná životnost součásti za zvýšených teplot je 100 000 h = 11 let,
v laboratoři se provádí zkoušky asi 10% životnosti tj. 10 000 h = více než rok.

$$\dot{\epsilon}_{SC} = A \sigma^n \exp \left\{ -\frac{Q}{RT} \right\}$$

$n = 1$ difusní creep; $n > 1$ dislokační creep

Zkoušky creepového chování



Měkké zatížení - potrubí

Tvrdé zatížení - šrouby

Zkoušky creepového chování

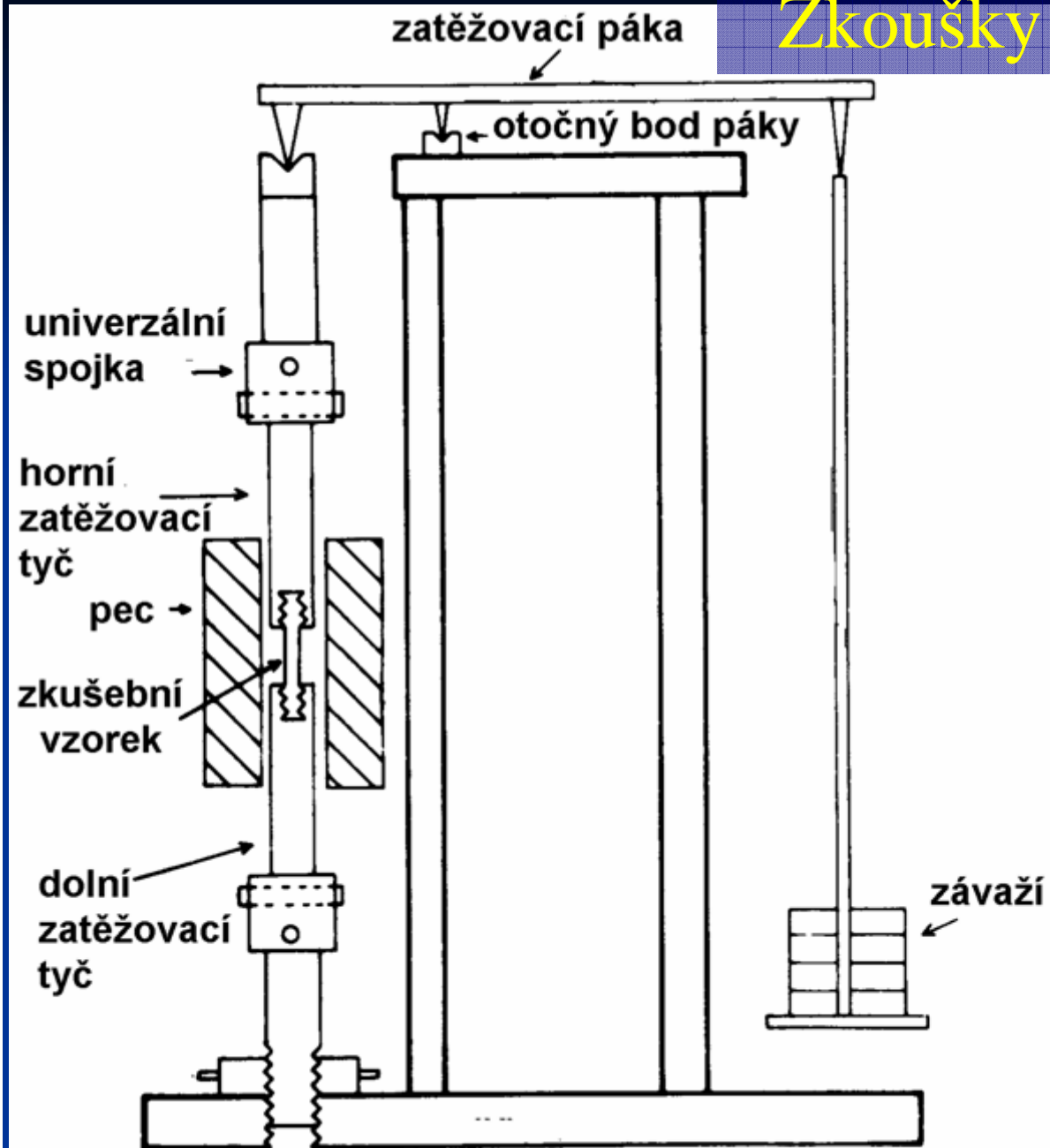


Schéma
zkušebního
stroje na
creepové
zkoušky
při konstantním
zatížení (napětí)

Zkoušky creepového chování

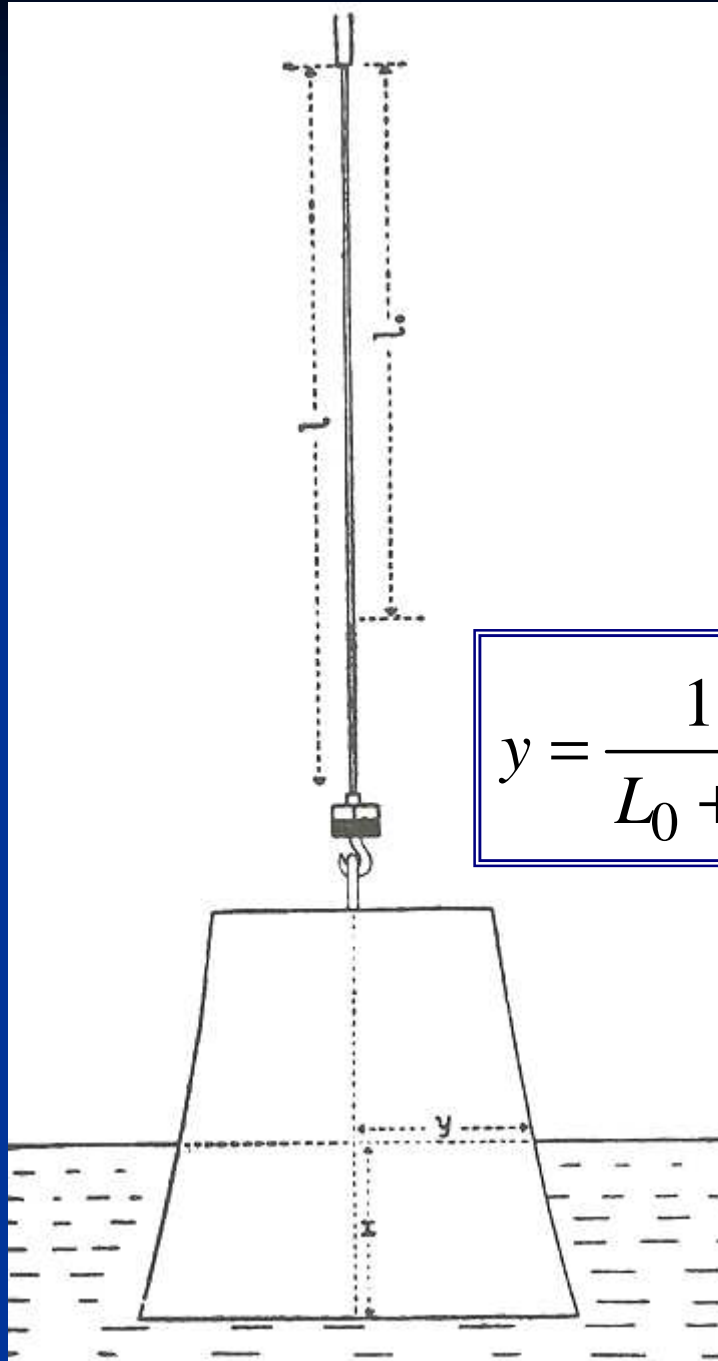


Měří se:

- deformace na čase
- doba do lomu

Zkoušky creepového chování

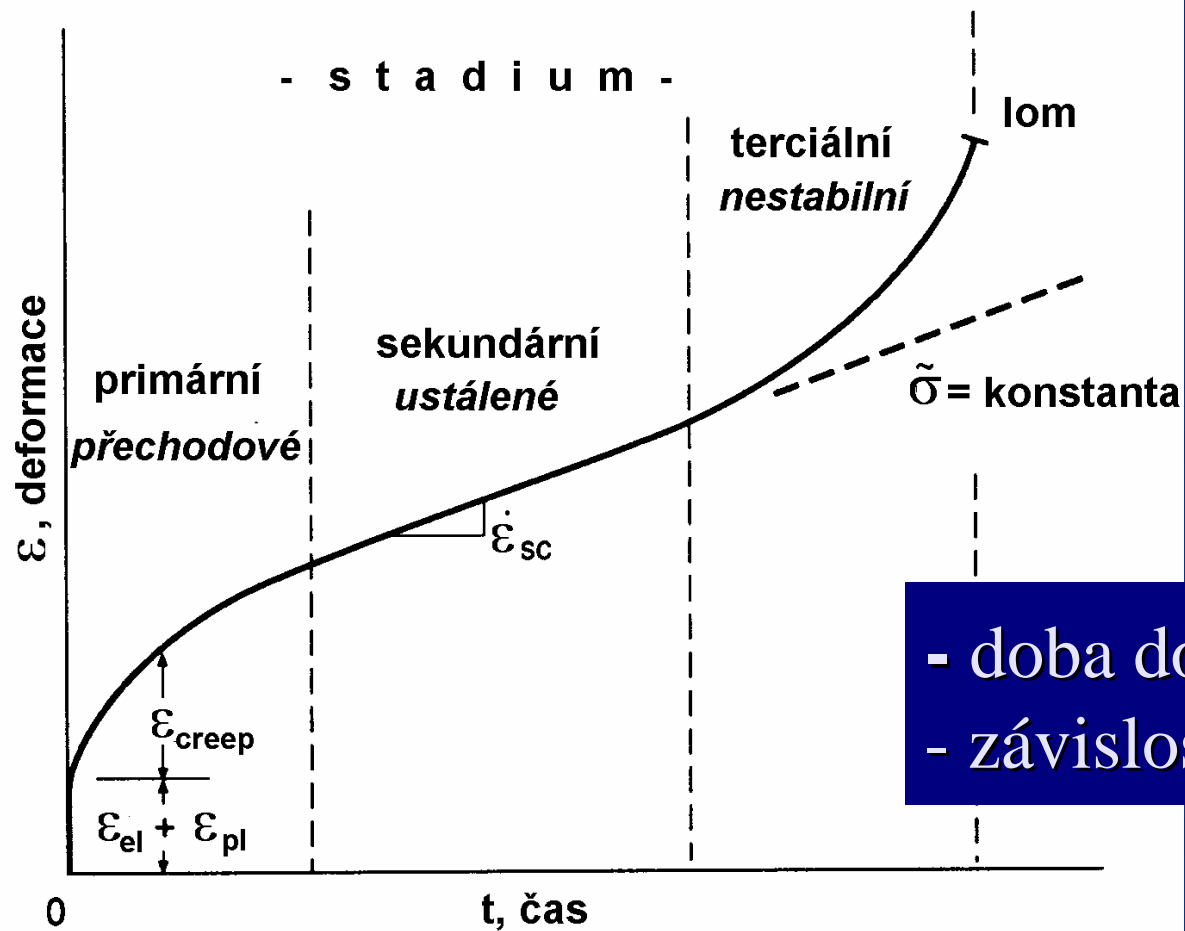
Andradeho
zkouška tečení při
konstantním
skutečném napětí
během rovnoměrné
deformace
zkušebního tělesa



$$y = \frac{1}{L_0 + x} \sqrt{\frac{M \cdot L_0}{\pi \cdot \rho}}$$

Zkoušky creepového chování

Měřené charakteristiky:



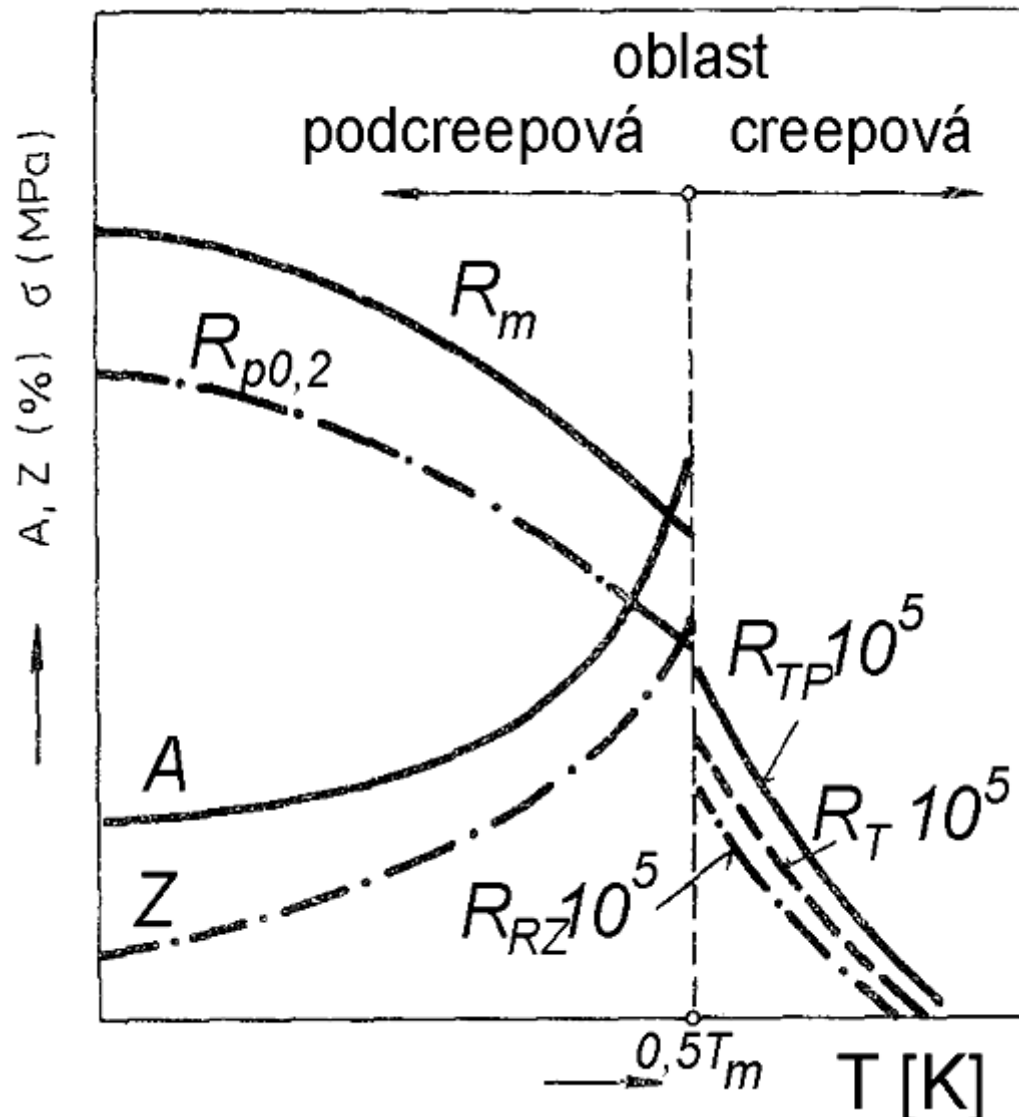
- doba do lomu
- závislost deformace na čase

Creep (kríp) – tečení

- i. Vliv zvýšených teplot na vlastnosti ocelí
- ii. Zkoušení creepového chování
- iii. Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu
- iv. Deformace a lom při creepu
- v. Parametry ekvivalence teploty a času
- vi. Spolupráce materiálového inženýra a konstruktéra při vývoji lopatek turbíny tryskového letadla

Charakteristiky odolnosti vůči creepu

Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu:



Mez pevnosti při tečení

$(\sigma_r) R_{TP}$ MPa
teplota / čas do lomu

Mez tečení

$(\sigma_{A1}) R_T$ MPa
teplota / velikost
deformace / čas deformace

RELAXACE

Výchozí napětí R_R MPa
/teplota

Zbytkové napětí R_{RZ} MPa
/teplota / čas zkoušky

Charakteristiky odolnosti vůči creepu

příklady

- Mez pevnosti při tečení R_{TP} **P265H (11 418)**

$$R_e = 265 \text{ MPa}; \quad R_m = 450 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r = \langle \text{MPa} / ^\circ\text{C} / \text{hod} \rangle = 165 / 380 / 10^5$$

- Mez tečení R_T **P265H (11 418)**

$$R_e = 265 \text{ MPa}; \quad R_m = 450 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{A1} = \langle \text{MPa} / ^\circ\text{C} / \% / \text{hod} \rangle = 132 / 380 / 1 / 10^5$$

Charakteristiky odolnosti vůči creepu

příklady

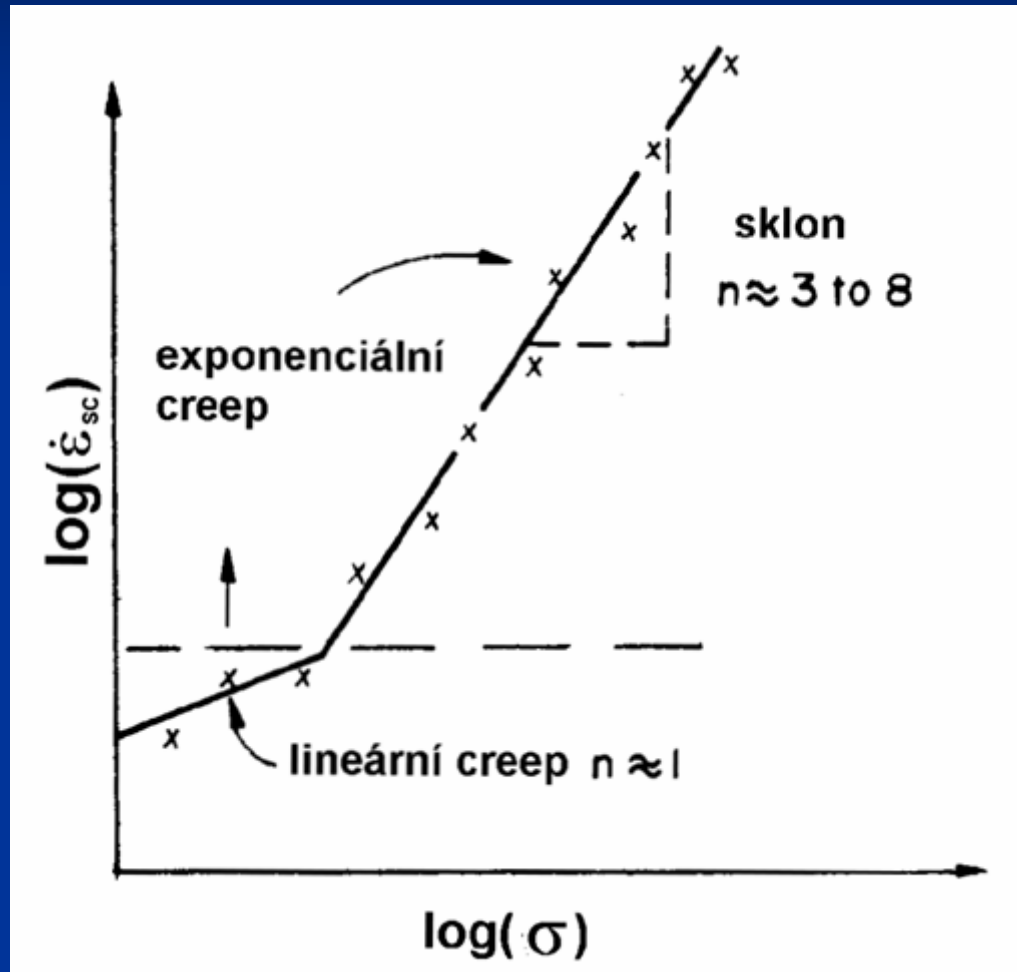
- Relaxace – výchozí a zbytkové napětí
13CrMo4-5 (15 121)

$$R_R = \langle \text{MPa}/^\circ\text{C} \rangle \quad R_{RZ} = \langle \text{MPa}/^\circ\text{C} / \text{hod} \rangle$$

$$R_R = 140 / 500 \quad R_{RZ} = 10 / 500 / 2 \cdot 10^3$$

Charakteristiky odolnosti vůči creepu

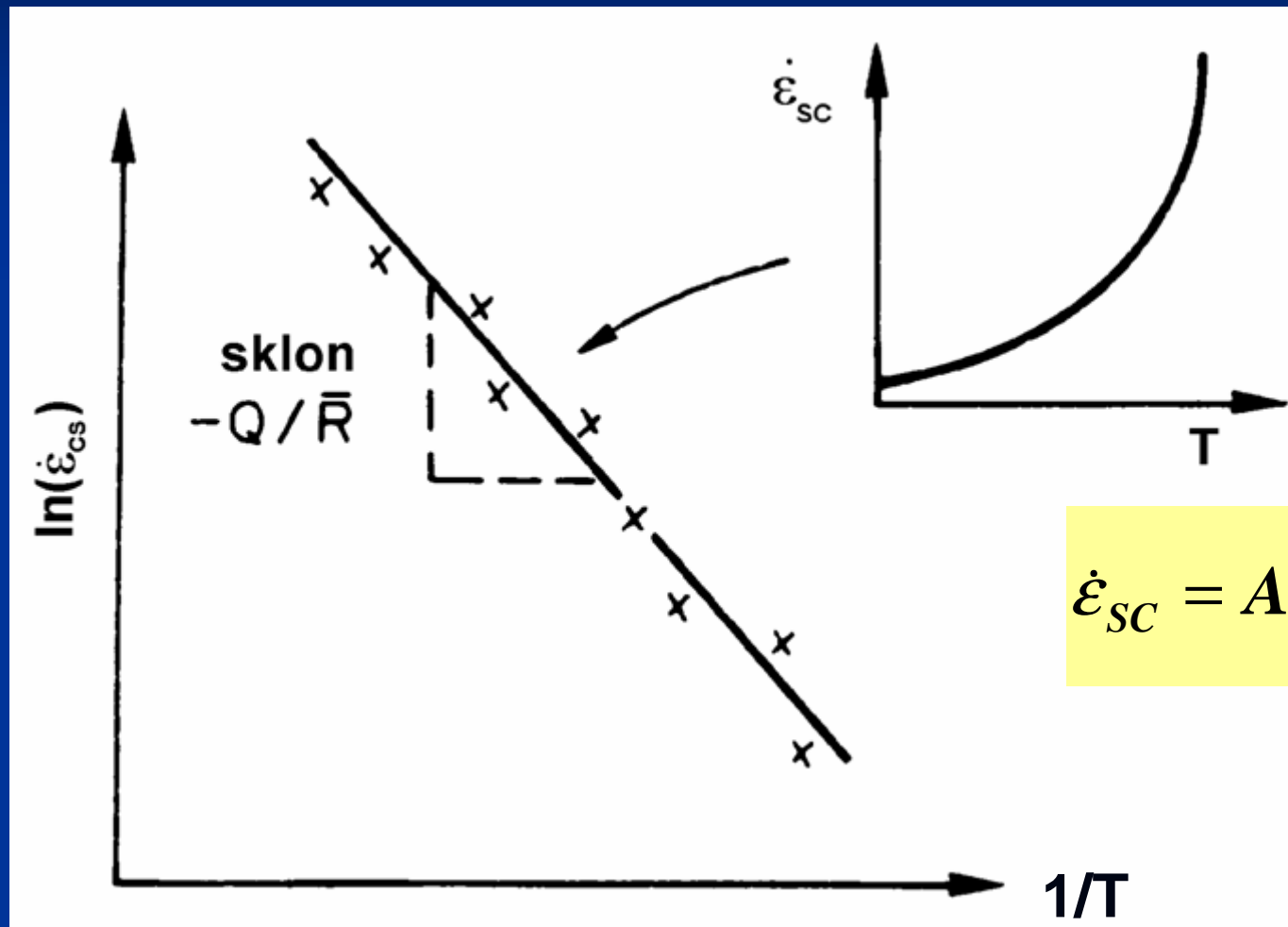
Určování creepových parametrů



$$\dot{\epsilon}_{sc} = A \sigma^n \exp\left\{-\frac{Q}{RT}\right\}$$

Charakteristiky odolnosti vůči creepu

Určování creepových parametrů



$$\dot{\epsilon}_{sc} = A \sigma^n \exp\left\{-\frac{Q}{RT}\right\}$$

Deformace a lom při creepu

Příčinou creepu je difuze atomů mřížky pod účinkem napětí a zvýšené teploty.

mechanismy

- viskózní creep $n = 1$
- creep polymerů $n \approx 1$
- difúzní creep $n \approx 1$
- dislokační creep $n = (3-8)$

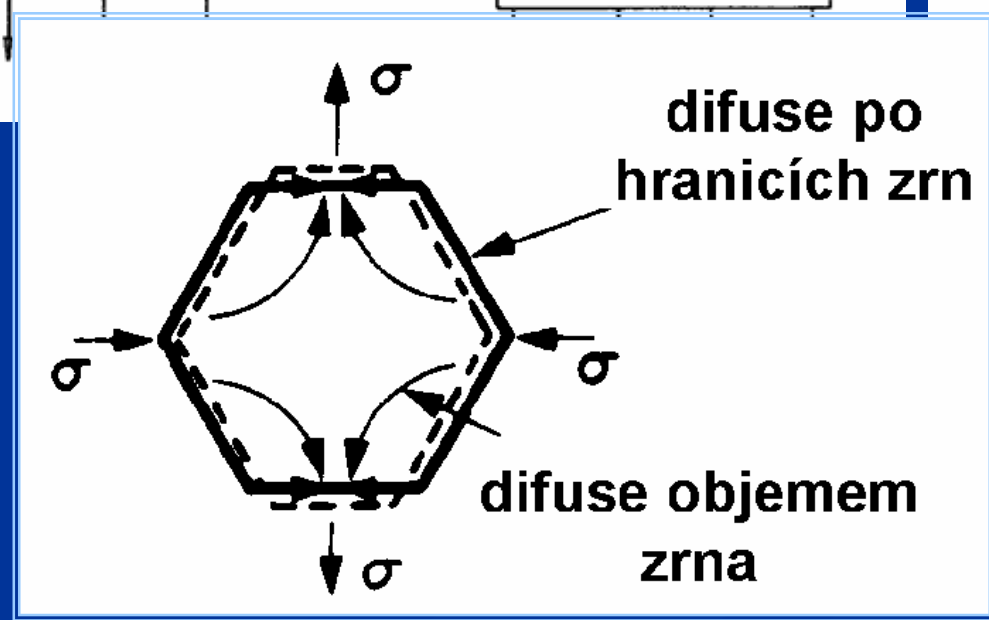
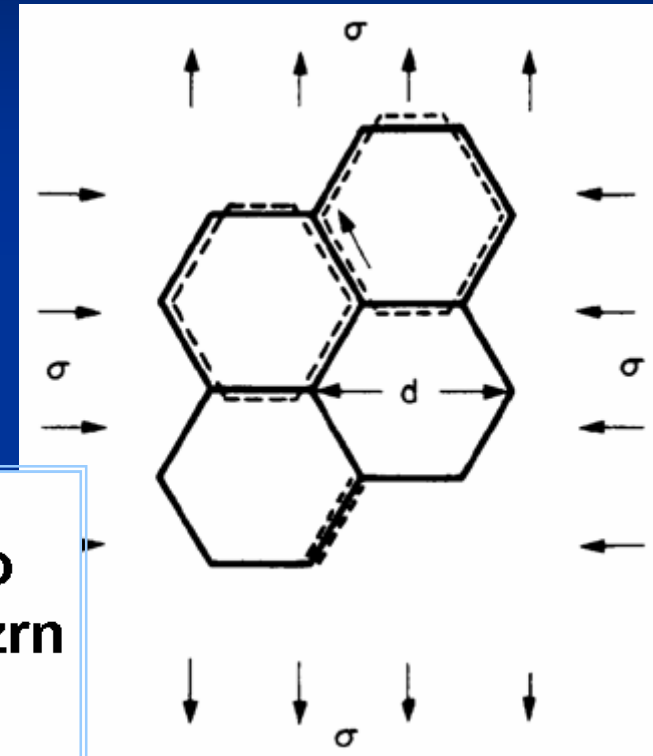
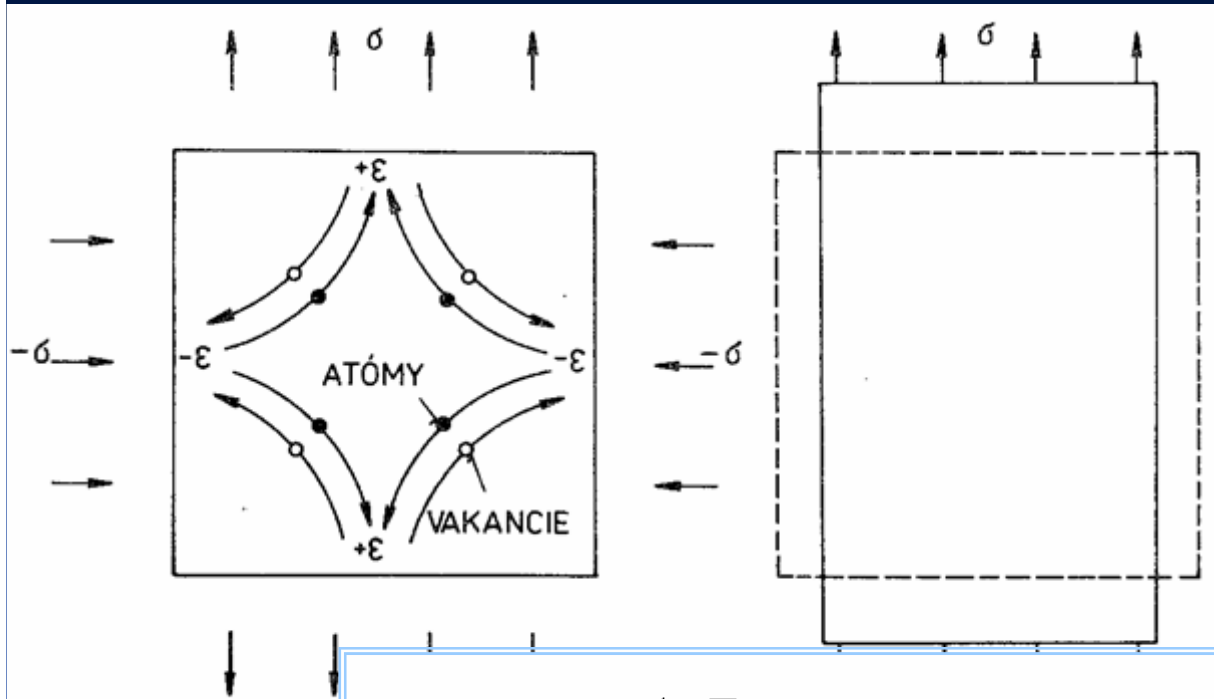
$$\dot{\epsilon}_{SC} = A\sigma^n \exp\left\{-\frac{Q}{RT}\right\}$$

U kovových materiálů - dva typy tečení:

- difusní creep
- dislokační creep

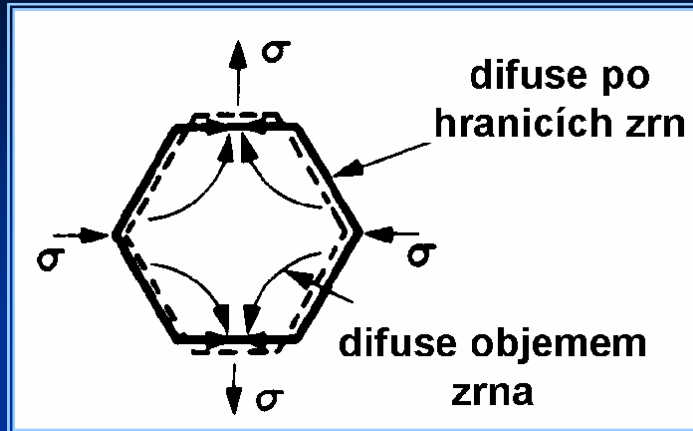
Deformace a lom při creepu

Difusní creep



Deformace a lom při creepu

Difusní creep



Difuse probíhá objemem zrn
(nižší napětí, vysoká teplota)

Herring Nabarro

$$\dot{\epsilon}_{SC} = \frac{\sigma A_1}{d^2} D_G$$

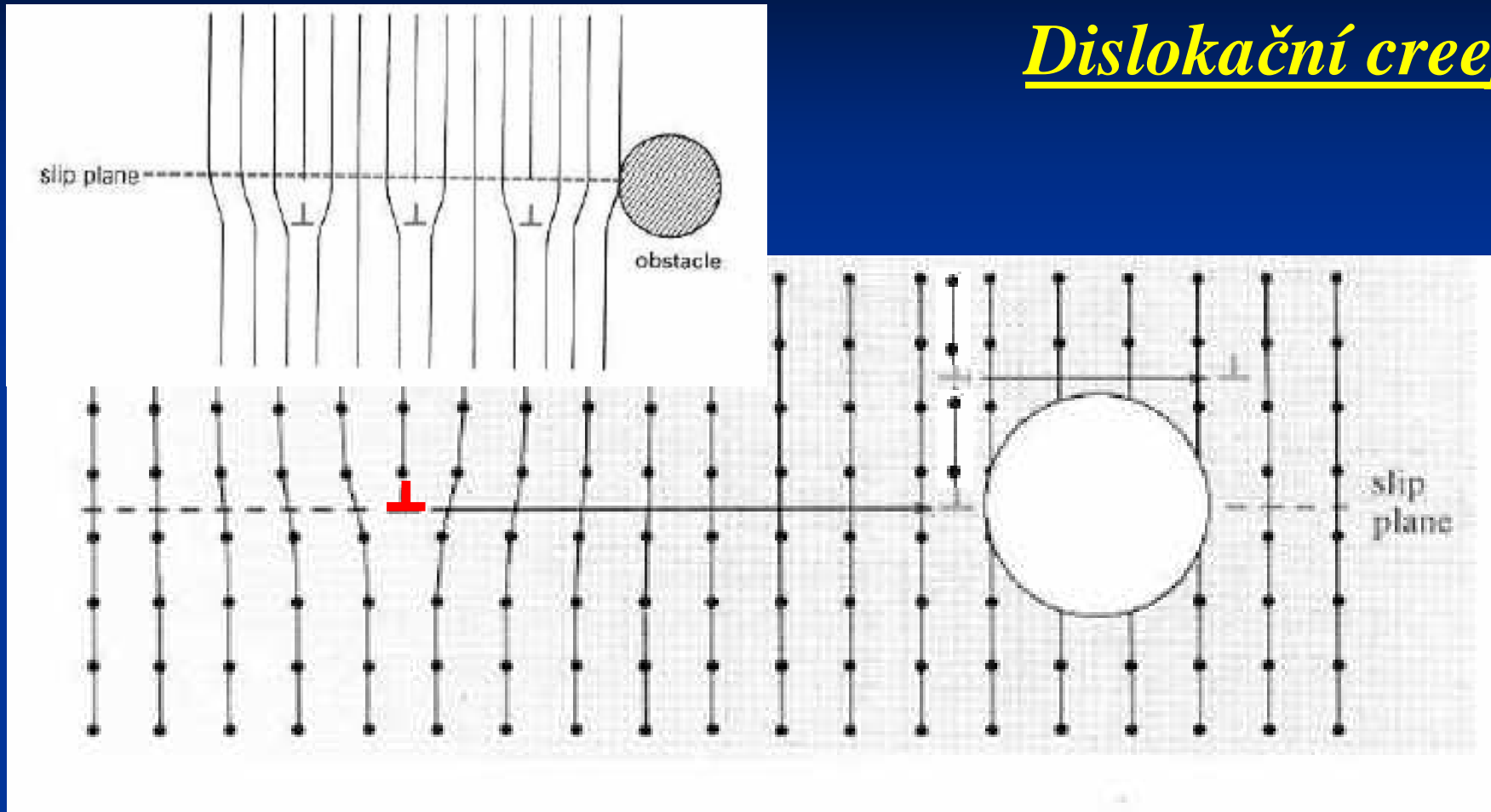
Difuse probíhá po hranicích zrn
(nižší napětí, nižší teplota)

Coble

$$\dot{\epsilon}_{SC} = \frac{\sigma A_2}{d^3} D_B$$

Deformace a lom při creepu

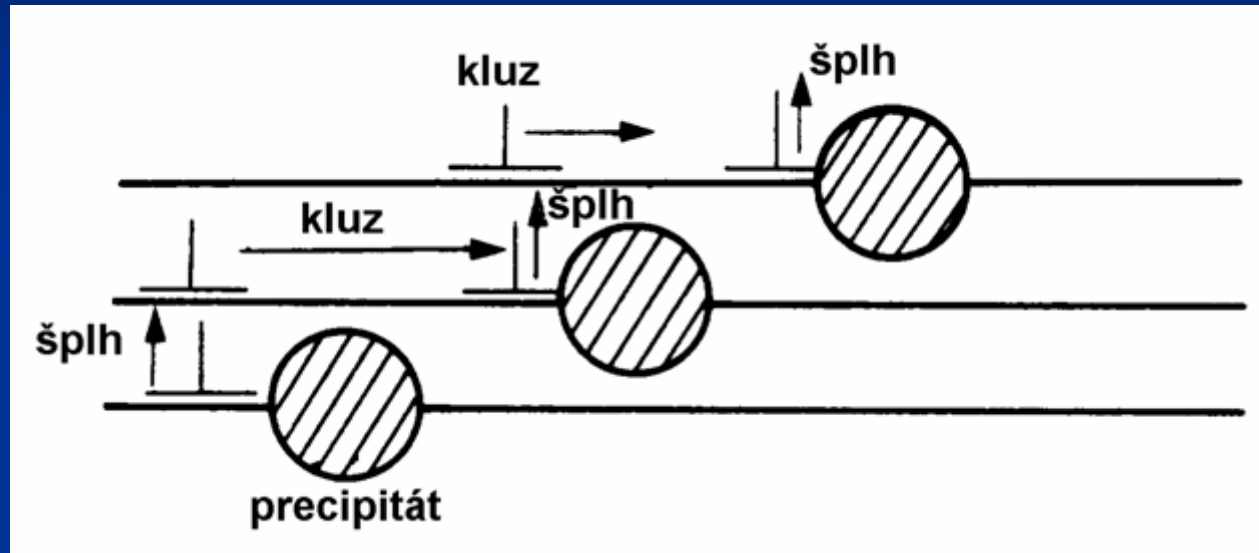
Dislokační creep



šplh dislokací

Deformace a lom při creepu

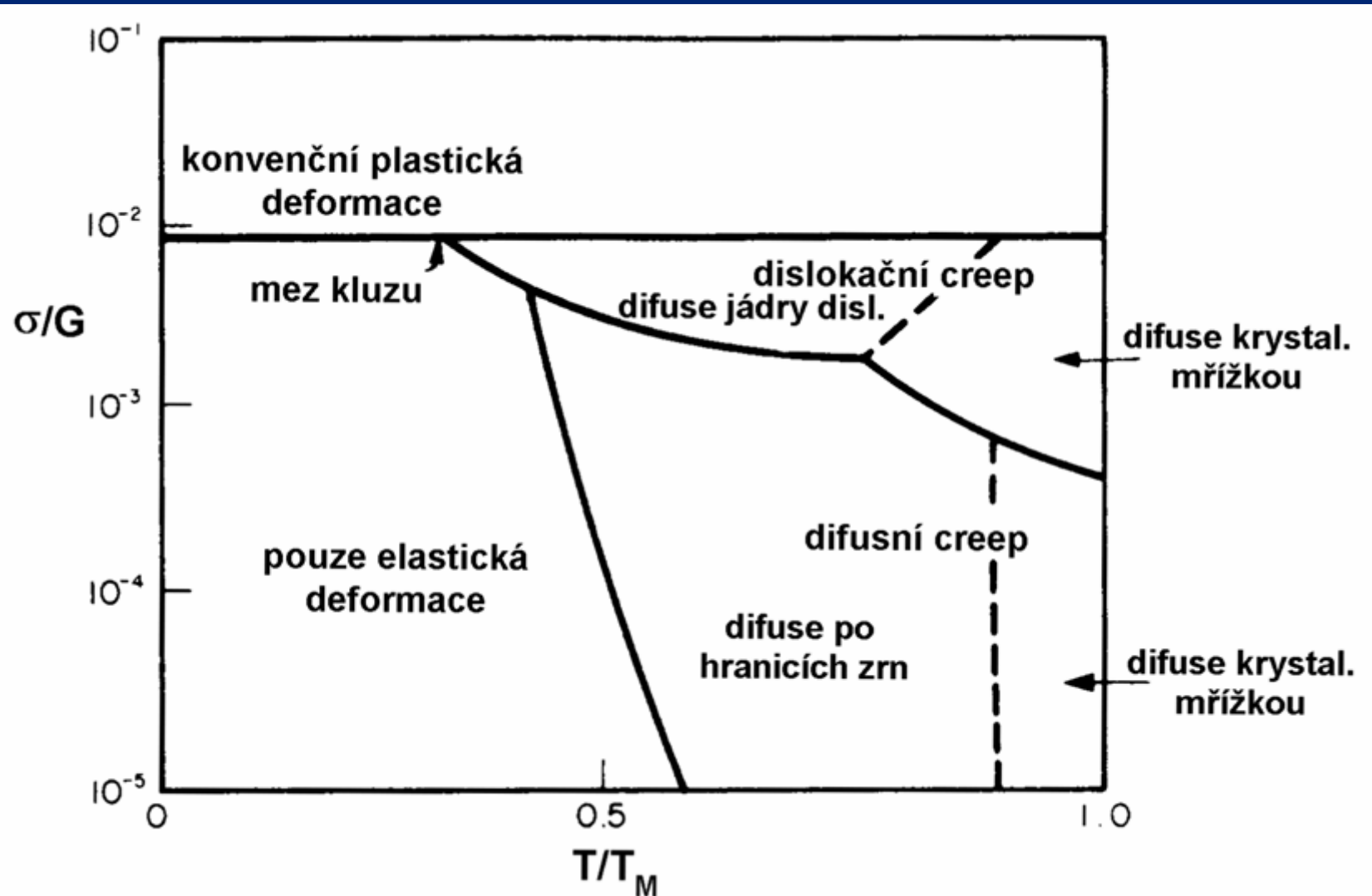
Dislokační creep



$$\dot{\epsilon}_{SC} = A_3 \sigma^n D_G; (n \approx 3 \text{ až } 8)$$

Deformace a lom při creepu

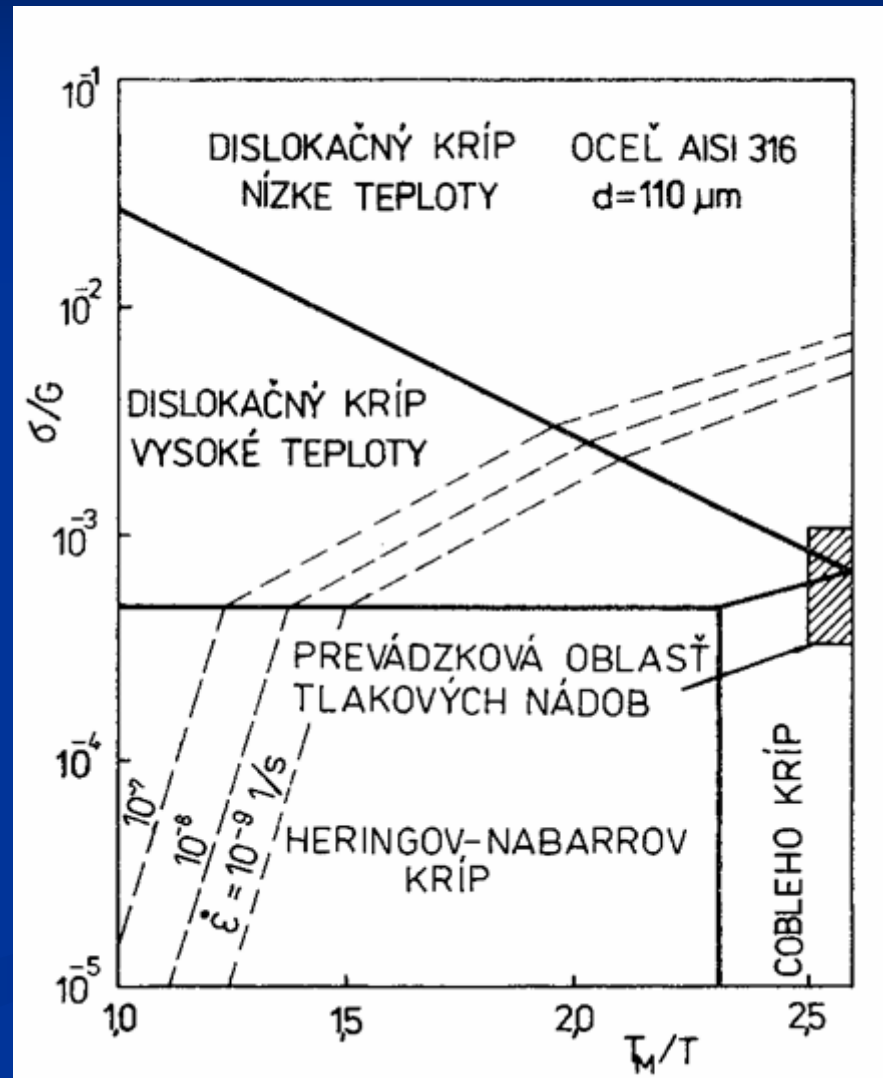
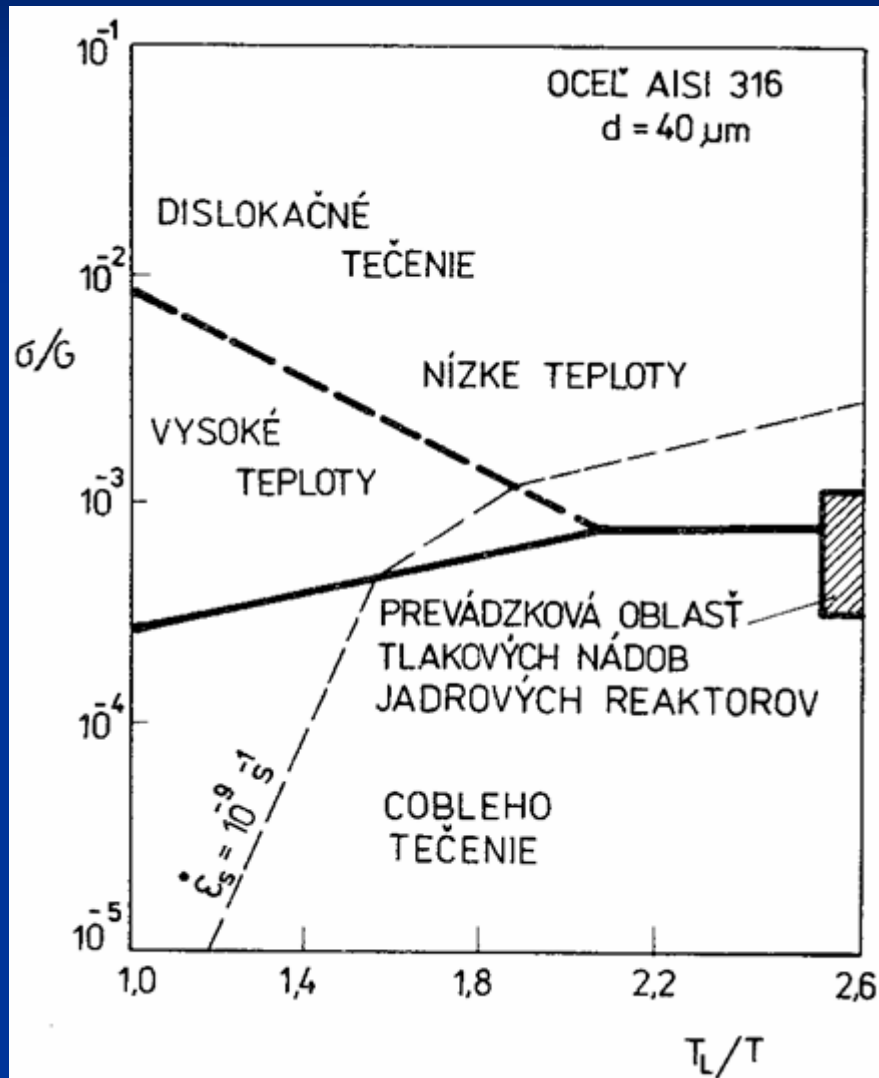
Mapy deformačních mechanismů



Deformace a lom při creepu

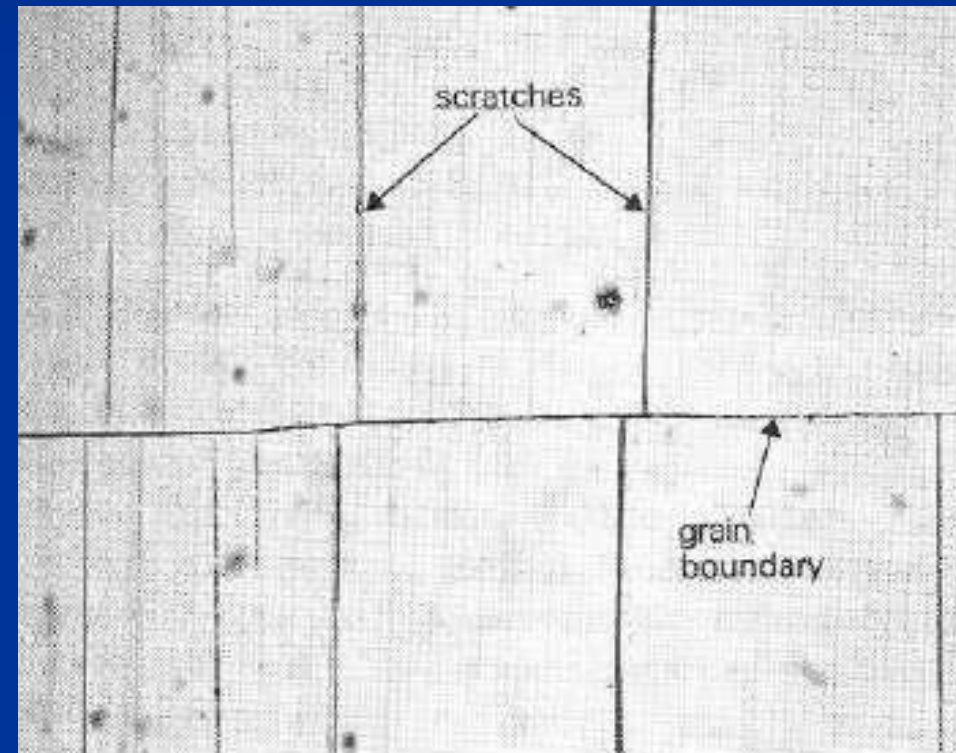
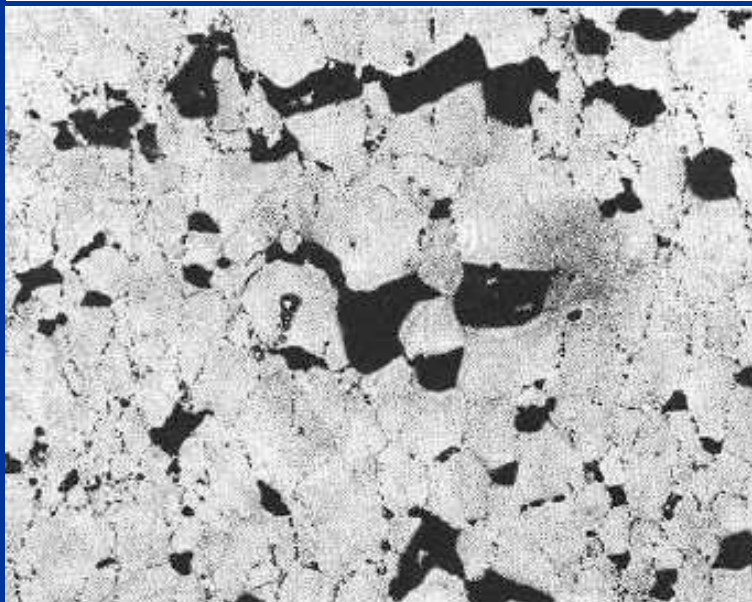
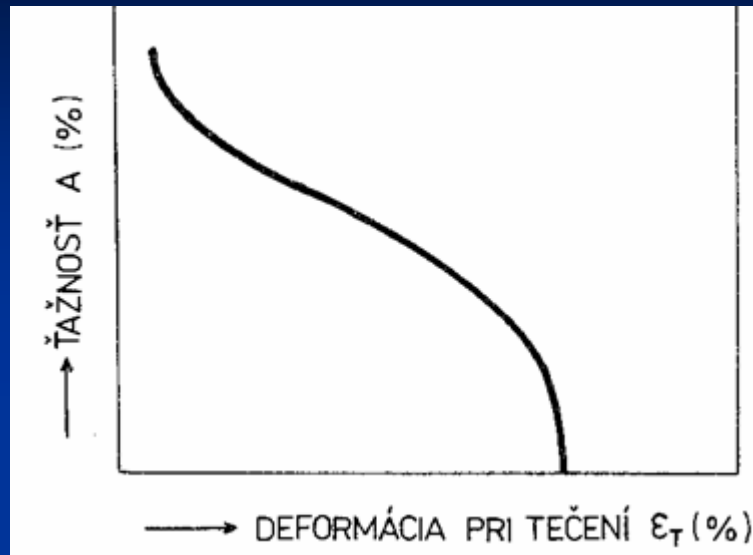
Příklad AISI 316 (16Cr-13Ni-2,5Mo)

Mapy deformačních mechanismů



Deformace a lom při creepu

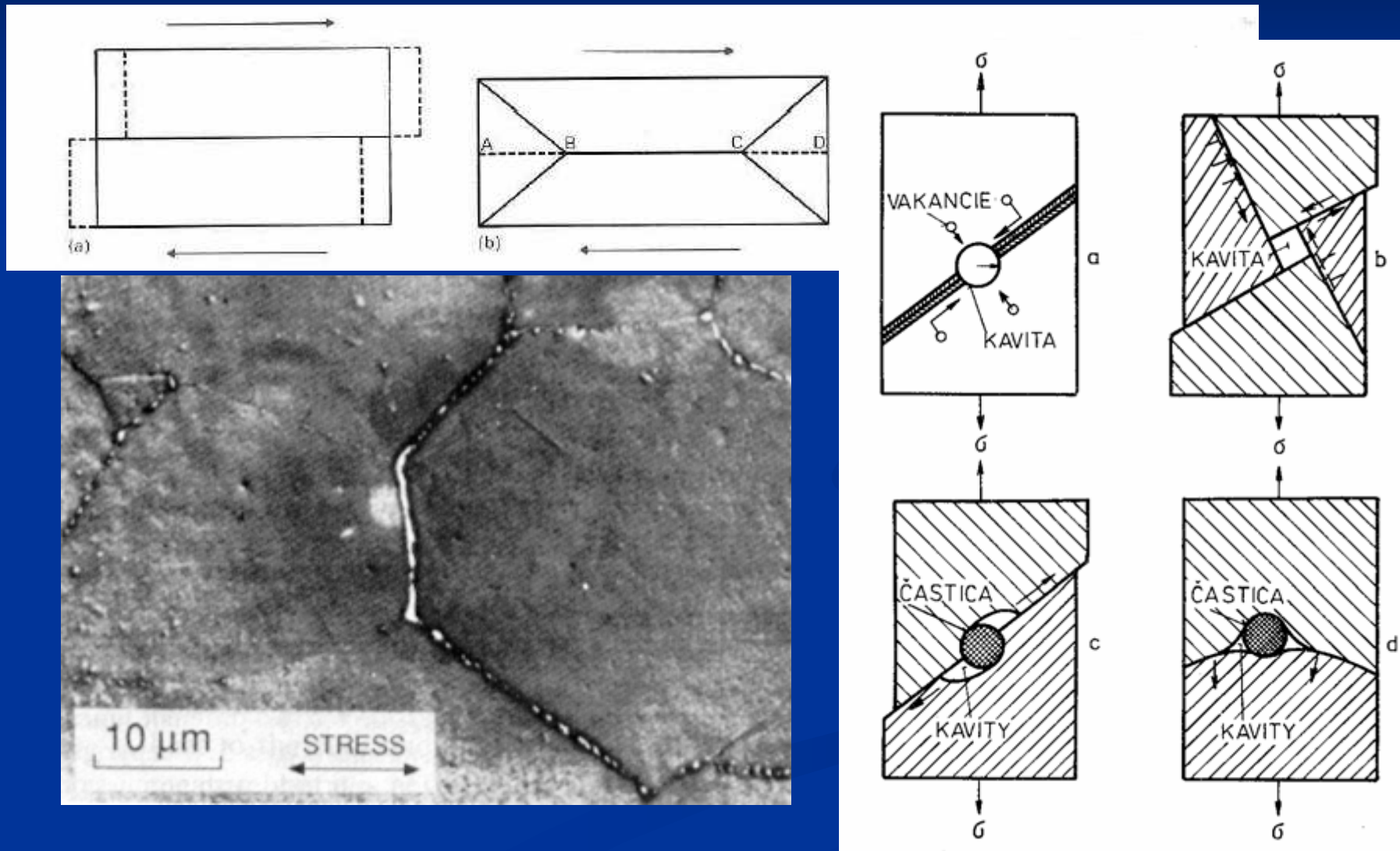
Lom při creepu



Deformace a lom při creepu

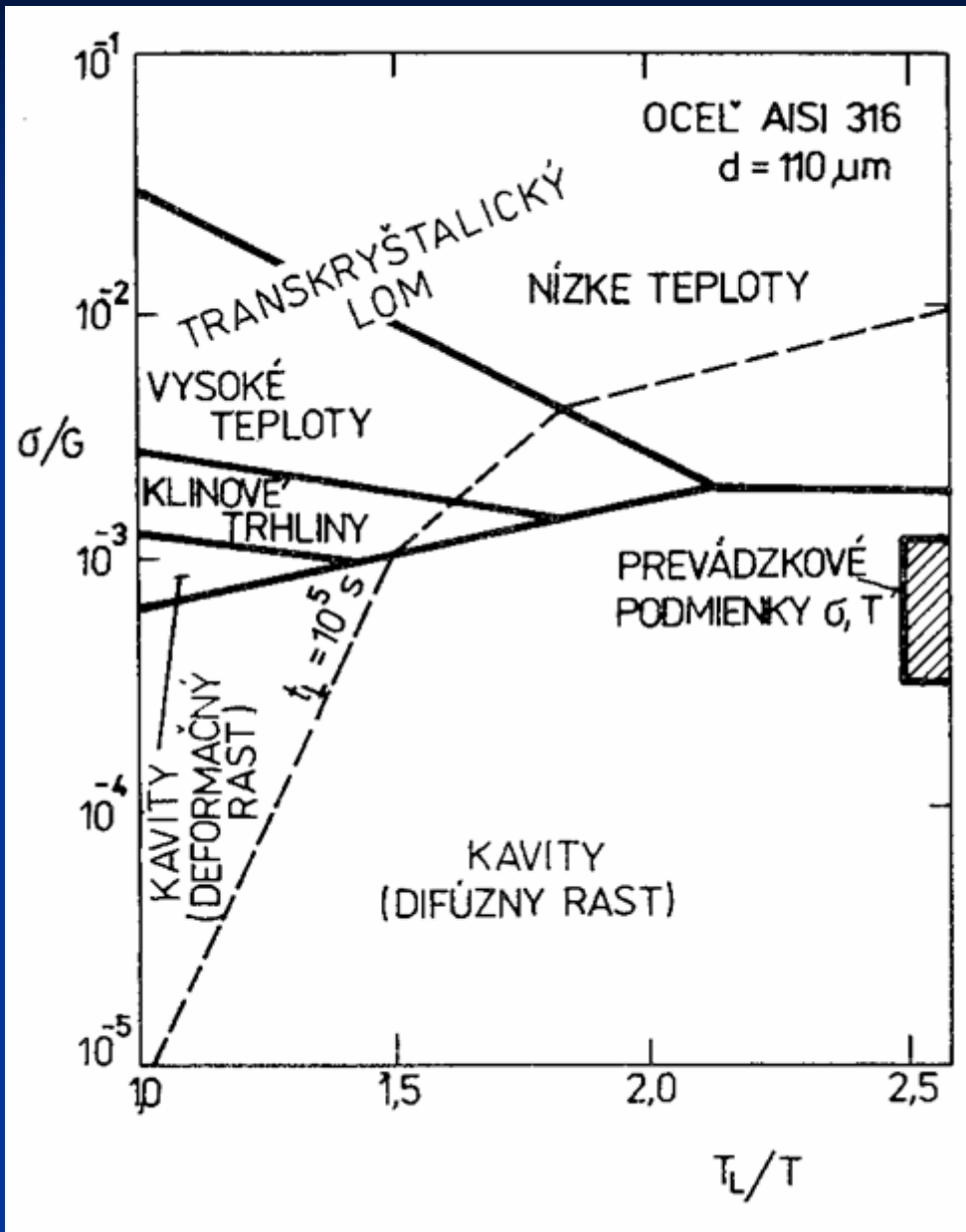
Pokluzu po hranicích - vznik kavit

Lom při creepu



Deformace a lom při creepu

Lomová mapa



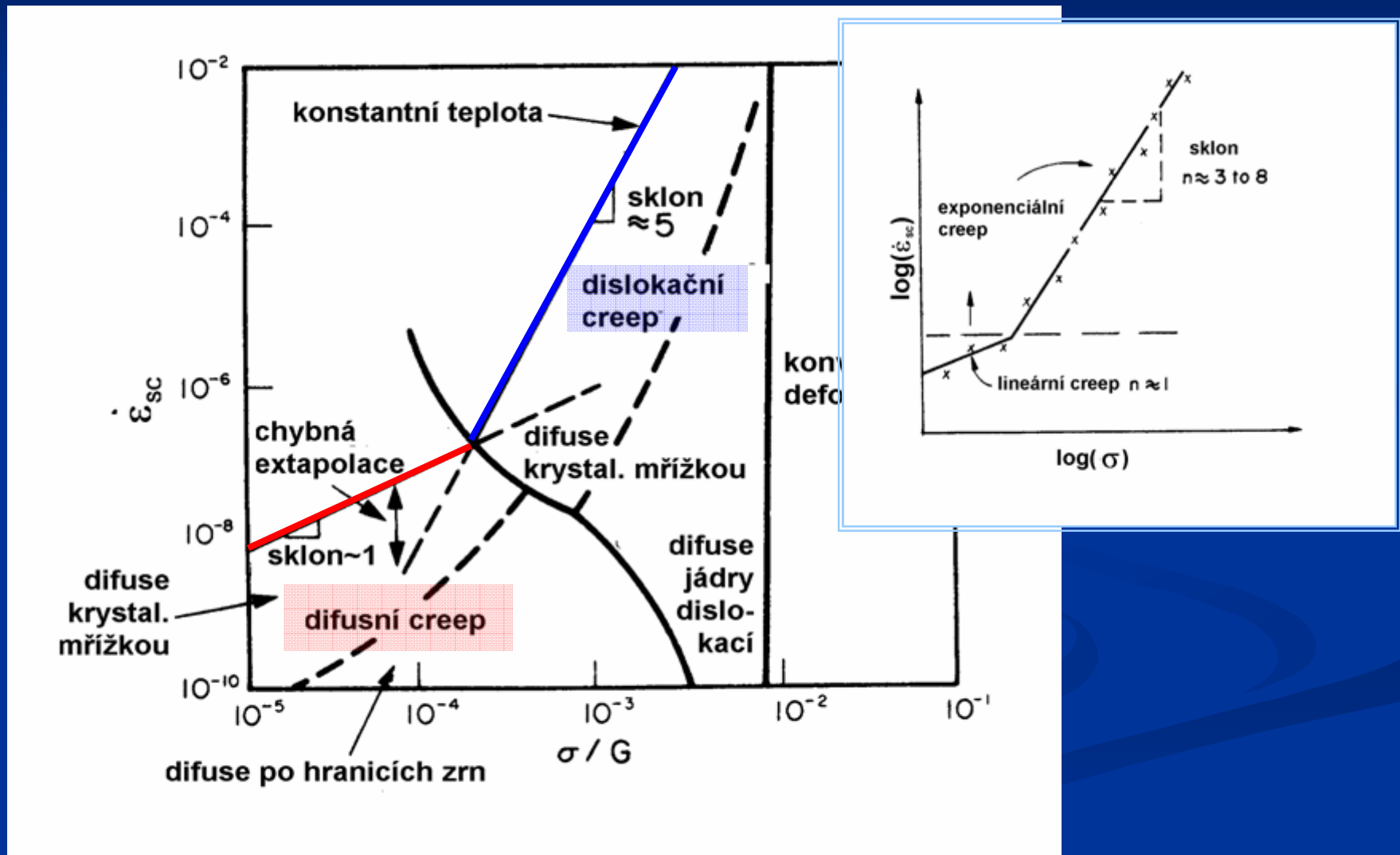
*Ponaučení:
hranice kolmé na
směr působícího
napětí jsou
nežádoucí*

Creep (kríp) – tečení

- i. Vliv zvýšených teplot na vlastnosti ocelí
- ii. Zkoušení creepového chování
- iii. Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu
- iv. Deformace a lom při creepu
- v. Parametry ekvivalence teploty a času
- vi. Spolupráce materiálového inženýra a konstruktéra při vývoji lopatek turbíny tryskového letadla

Parametry ekvivalence teploty a času

Laboratoř (1-2 roky) – provoz (10-20let)



Parametry ekvivalence teploty a času

Nejčastěji uváděné parametry
ekvivalence teploty a času:

Sherbyův – Dornův

Larsonův – Millerův

Mansonův - Haferdův

Parametry ekvivalence teploty a času

Při zkoušce i provozu je stejné napětí

- *Sherby & Dorn*

$$\dot{\varepsilon}_{sc} = \frac{d\varepsilon_{sc}}{dt} = A(\sigma)e^{-\frac{Q}{RT}}$$

$$d\varepsilon_{sc} = A(\sigma)e^{-\frac{Q}{RT}} dt$$

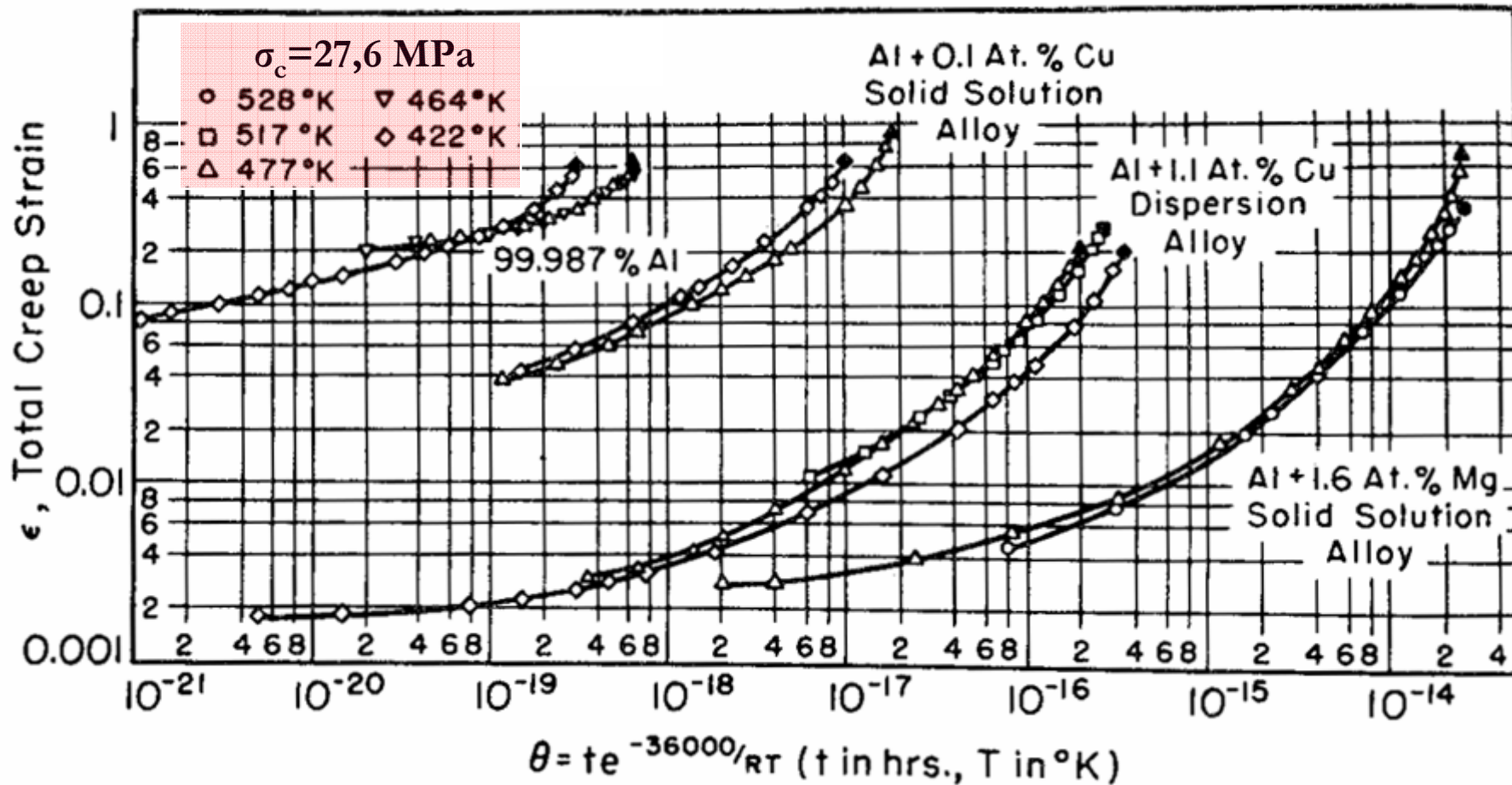
Po integraci a úpravě

(Vypuštění integrační konstanty =
zanedbání primárního stadia)

$$\theta = \frac{\varepsilon_{sc}}{A(\sigma)} = t \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Parametry ekvivalence teploty a času

Sherbyův – Dornův parametr



Parametry ekvivalence teploty a času

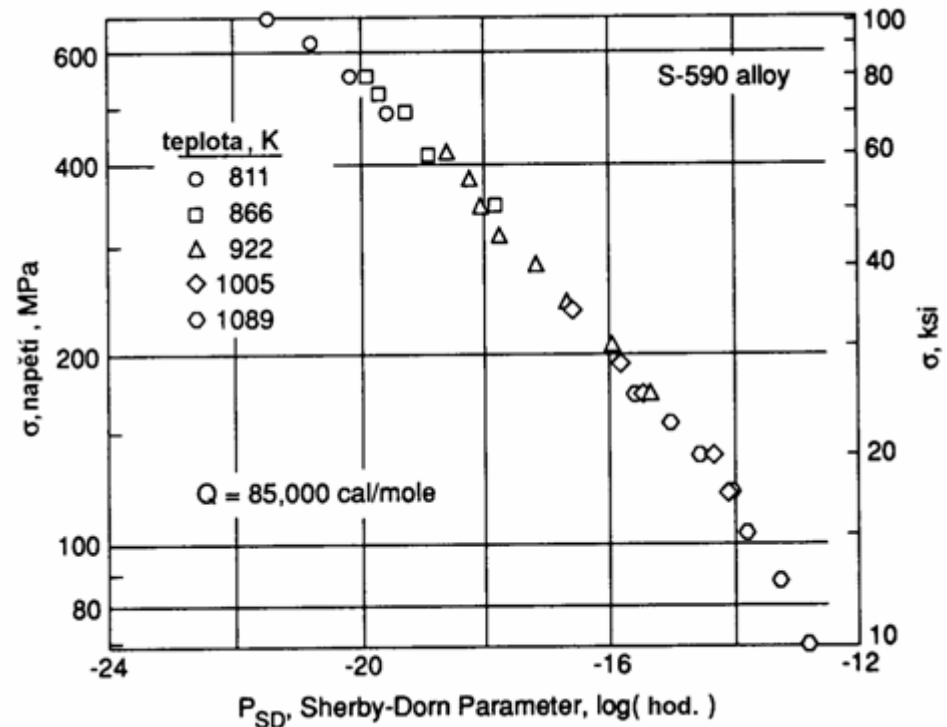
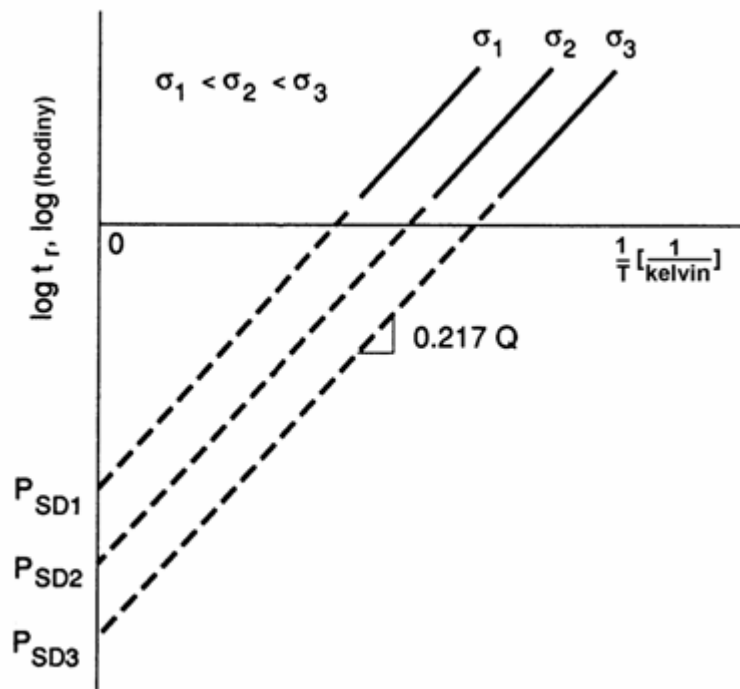
Sherbyův – Dornův parametr

$$P_{SD} = \log \theta = \log t - 0,217 \frac{Q}{T}$$

$$\langle R = 2 \text{ cal / kmol}; \log_{10} e = 0,434 \rangle$$

$$\theta = \frac{\varepsilon_{sc}}{A(\sigma)} = t \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Pro oceli $Q \sim 90\,000 \text{ cal/mol}$



Parametry ekvivalence teploty a času

Sherbyův – Dornův parametr

Příklad

$$P_{SD} = \log \theta = \log t - 0,217 \frac{Q}{T}$$

Součást vyrobená z legované oceli
je vystavena tahovému napětí 150 MPa.
Jaká je nejvyšší teplota, při které bude
součást funkční alespoň 40 dní?

Pro oceli
 $Q \sim 90\,000$
cal/mol

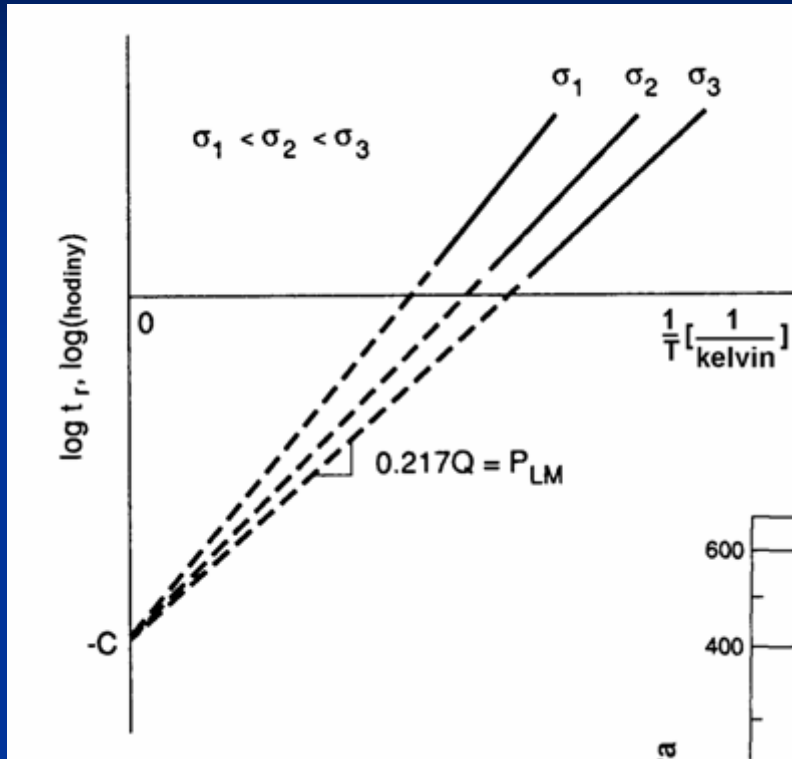
V laboratoři došlo k lomu po 260 hodinách za
teploty 530°C
(Při výpočtu použijte bezpečnostní faktor 10)

$$P_{SD} = \log(260) - 0,217 \frac{(90000)}{(530 + 273)} = -21,91$$

$$T = \frac{0,217 \cdot Q}{\log(t) - P_{SD}} = \frac{0,217 \cdot 90000}{\log(40 \cdot 24 \cdot 10) - (-21,91)} = 754 [K] = 481 [^{\circ}C]$$

Parametry ekvivalence teploty a času

Larson - Millerův parametr



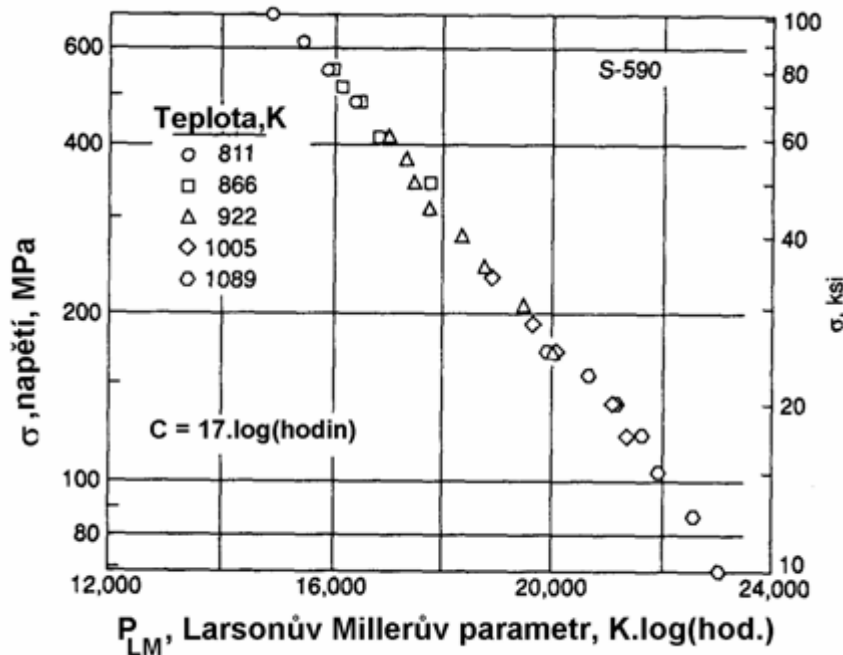
$$\log \theta = \log t - 0,217 \frac{Q}{T};$$

substituce $\log \theta = -C$

$$-C = \log t - \frac{0,217Q}{T}$$

$$P_{LM} = 0,217Q = T[\log t + C]$$

Potřebná znalost aspoň jedné dvojice bodů



Parametry ekvivalence teploty a času

Larson - Millerův parametr

Příklad – předchozí, řešený podle P_{LM}

$$P_{LM} = T [\log t + C] = (530 + 273) [\log 260 + 20] = 18 \cdot 10^3$$

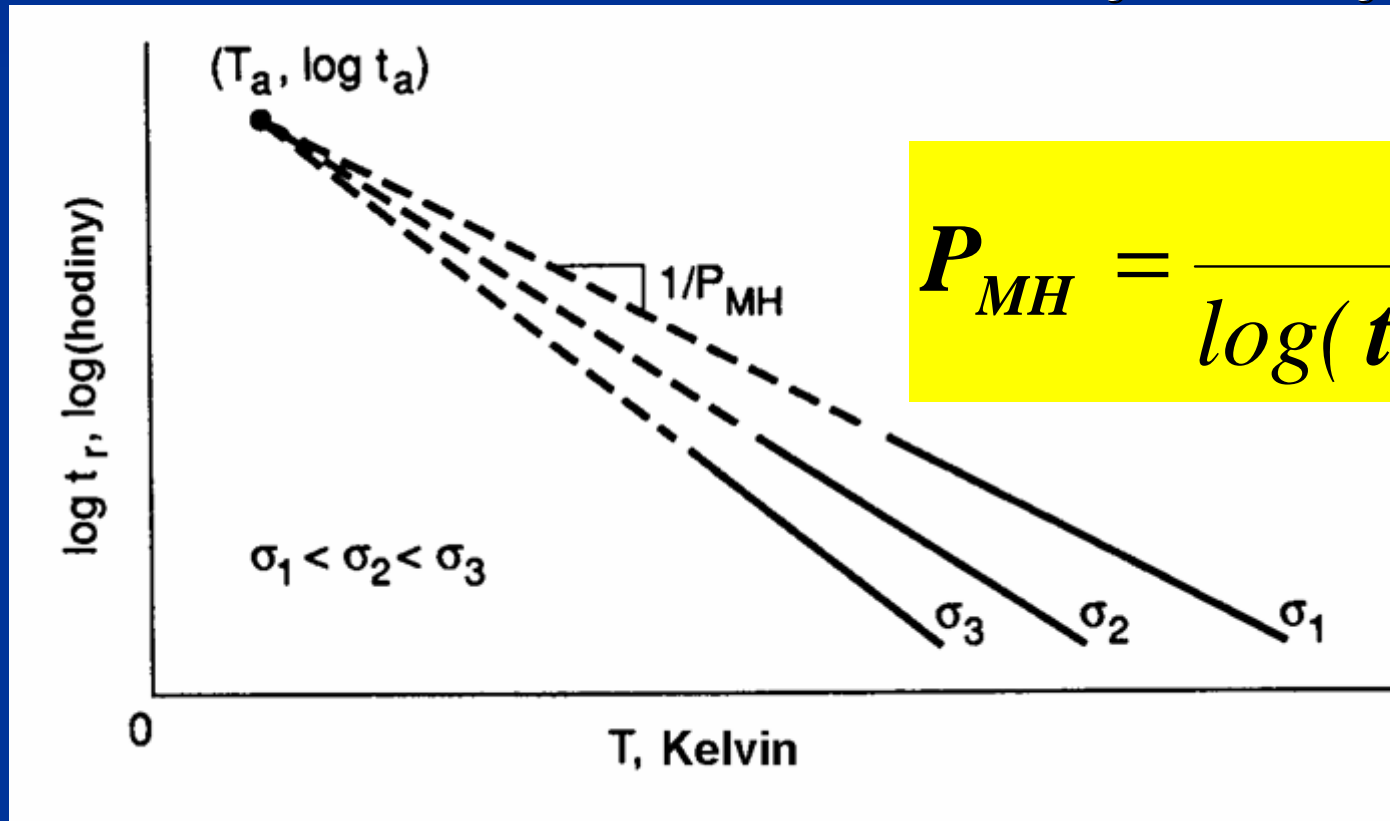
$$T = \frac{P_{LM}}{\log(t) + C} = \frac{18 \cdot 10^3}{\log(40.24 \cdot 10) + 20} = 715 [K] = 478 [^{\circ}C]$$

Parametry ekvivalence teploty a času

Mansonův - Haferdův parametr

předpokládáme, že závislost **log(t) vs T** za vysokých teplot je přímková

Potřebná znalost aspoň jedné dvojice bodů



$$P_{MH} = \frac{T - T_a}{\log(t_r) - \log(t_a)}$$

Spolupráce materiálového inženýra a designéra

Vývoj lopatek turbíny tryskového letadla

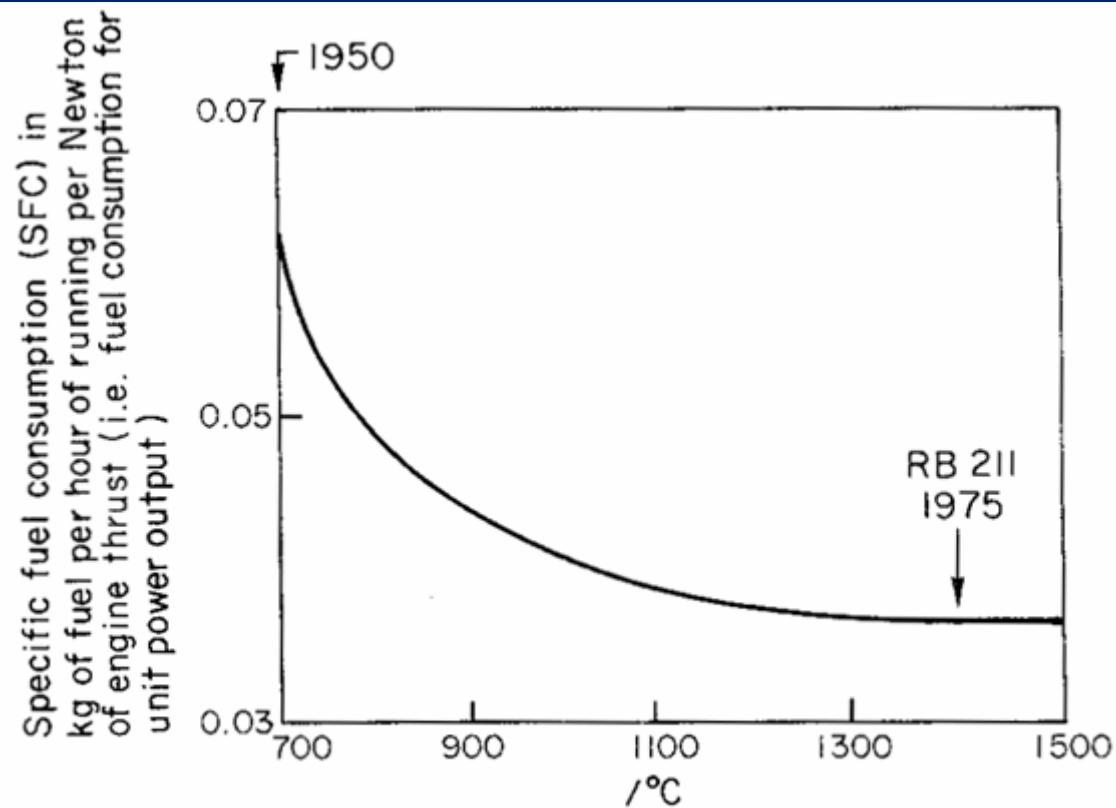


Fig. 20.1. Turbofan efficiency at different inlet temperatures.

Zvýšení účinnosti:

- 50 léta vstupní teplota **700°C** o 25 let později **1350°C**

další důvod ke zvyšování vstupní teploty byl výkon na jednotku hmotnosti motoru

Spolupráce materiálového inženýra a designéra

Vývoj lopatek turbíny tryskového letadla

Požadavky kladené na materiál lopatek turbíny

- **Odolnost vůči creepu**
- **Odolnost vůči vysokoteplotní oxidaci**
- **Houževnatost**
- **Odolnost vůči tepelné únavě**
- **Teplotní stabilita struktury**

Spolupráce materiálového inženýra a designéra

Vývoj lopatek turbíny tryskového letadla

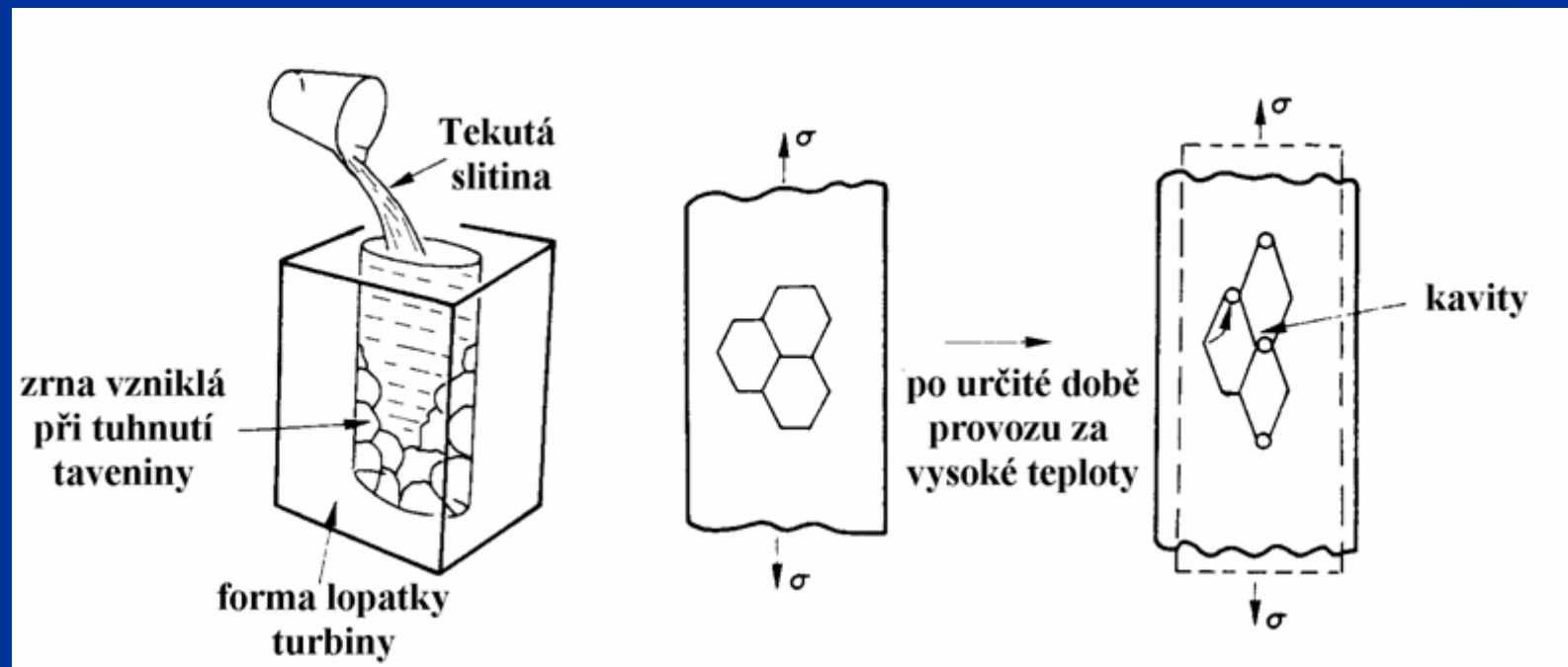
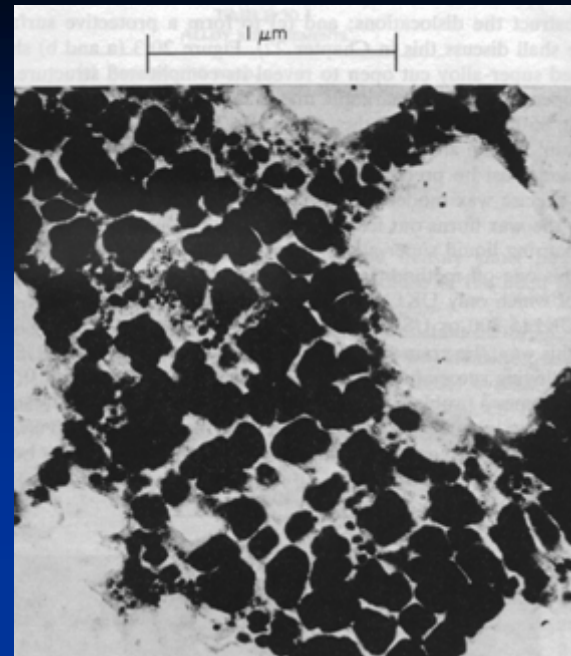
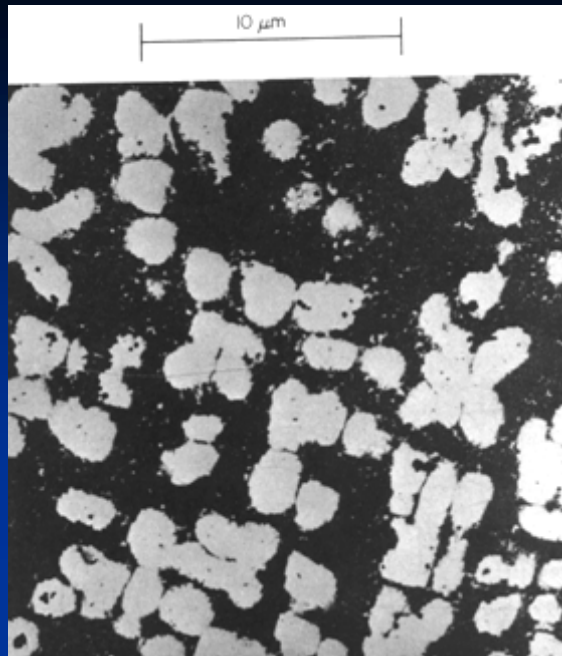
Materiál: superslitiny na bázi Ni (Nimonic, Inconel)

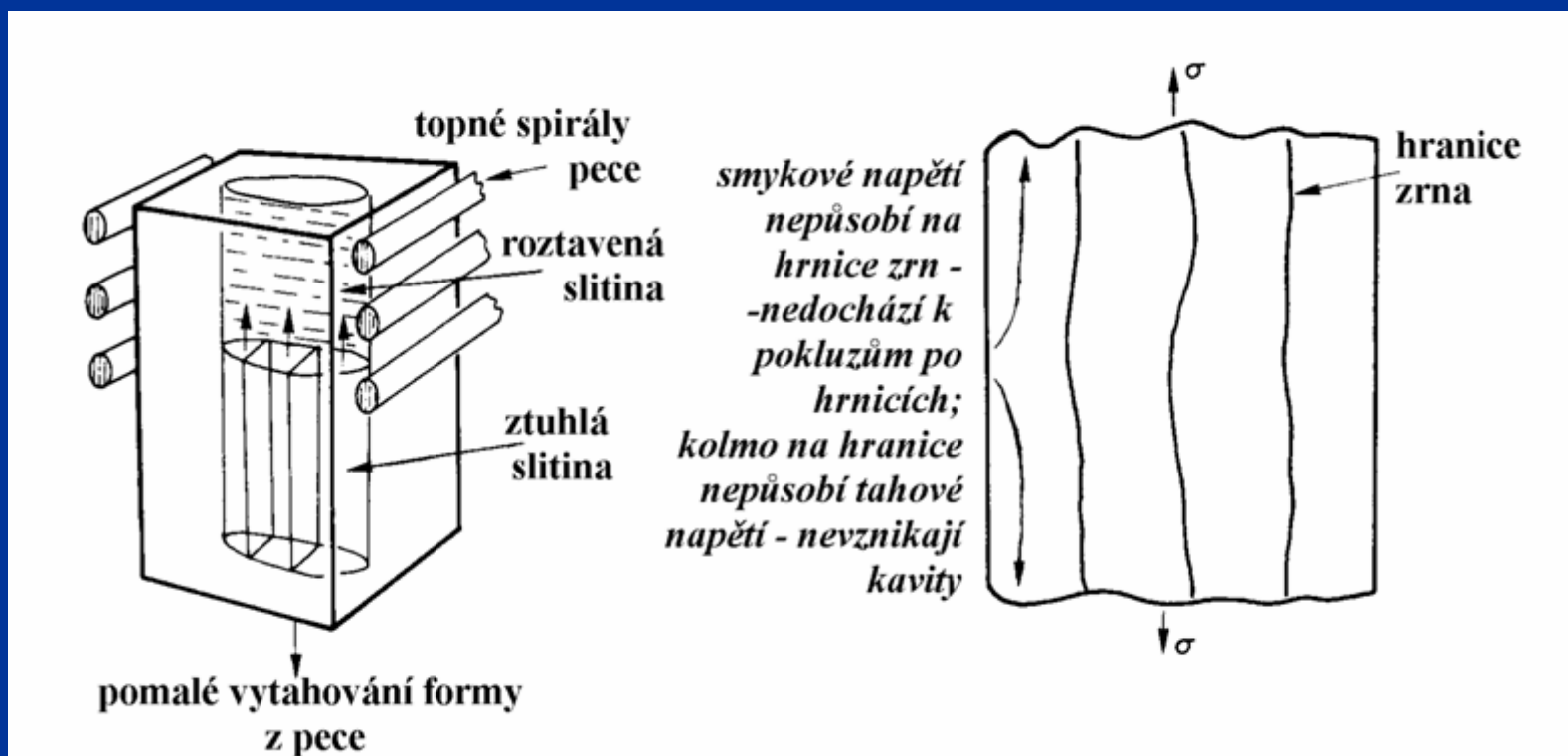
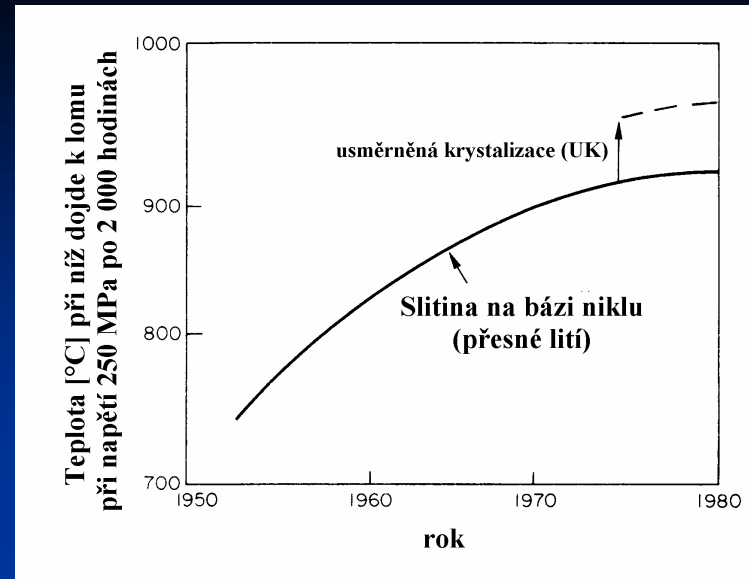
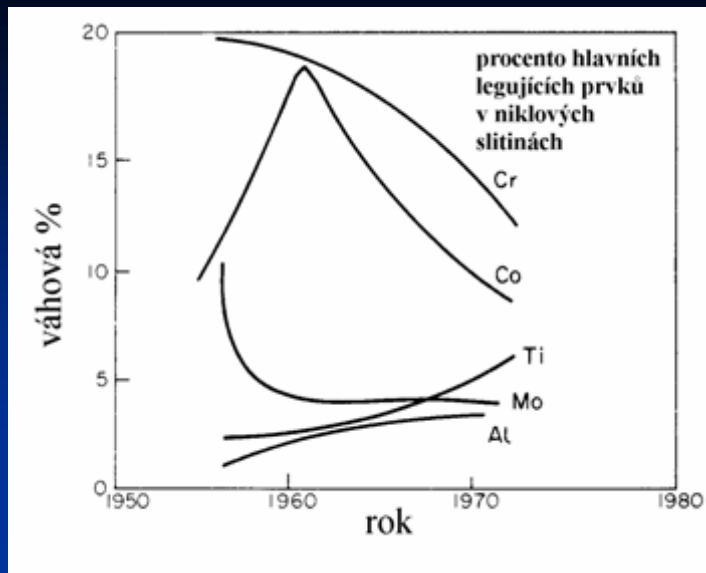
Požadavky: při startu napětí 250 MPa, teplota 850°C, 30 hod max. deformace $\varepsilon \approx 0,1\%$

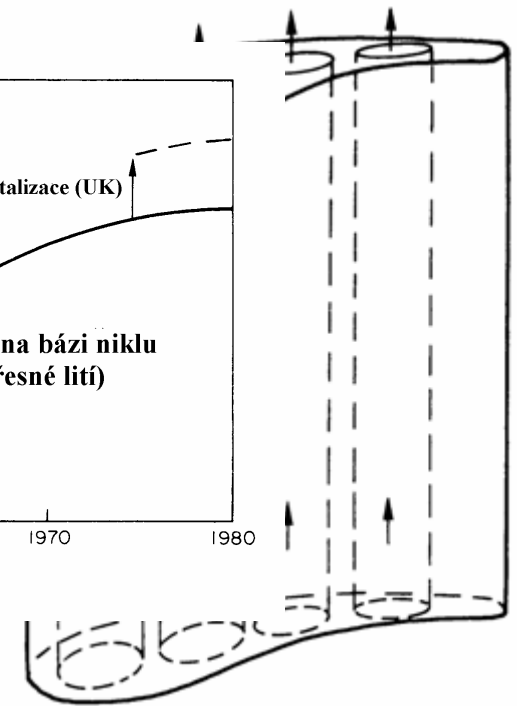
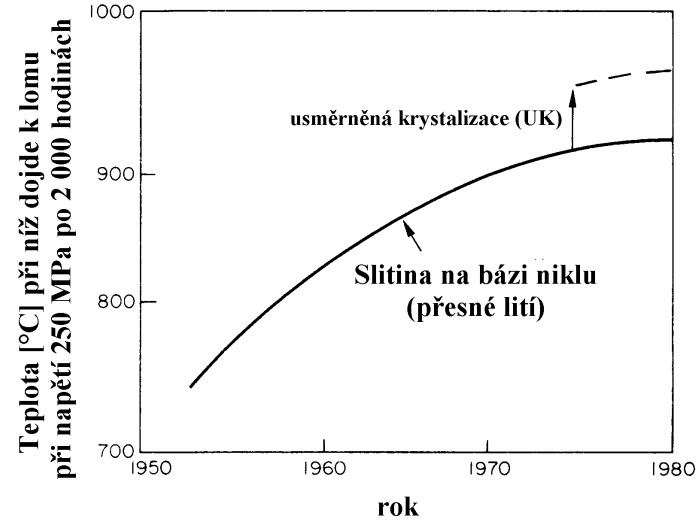
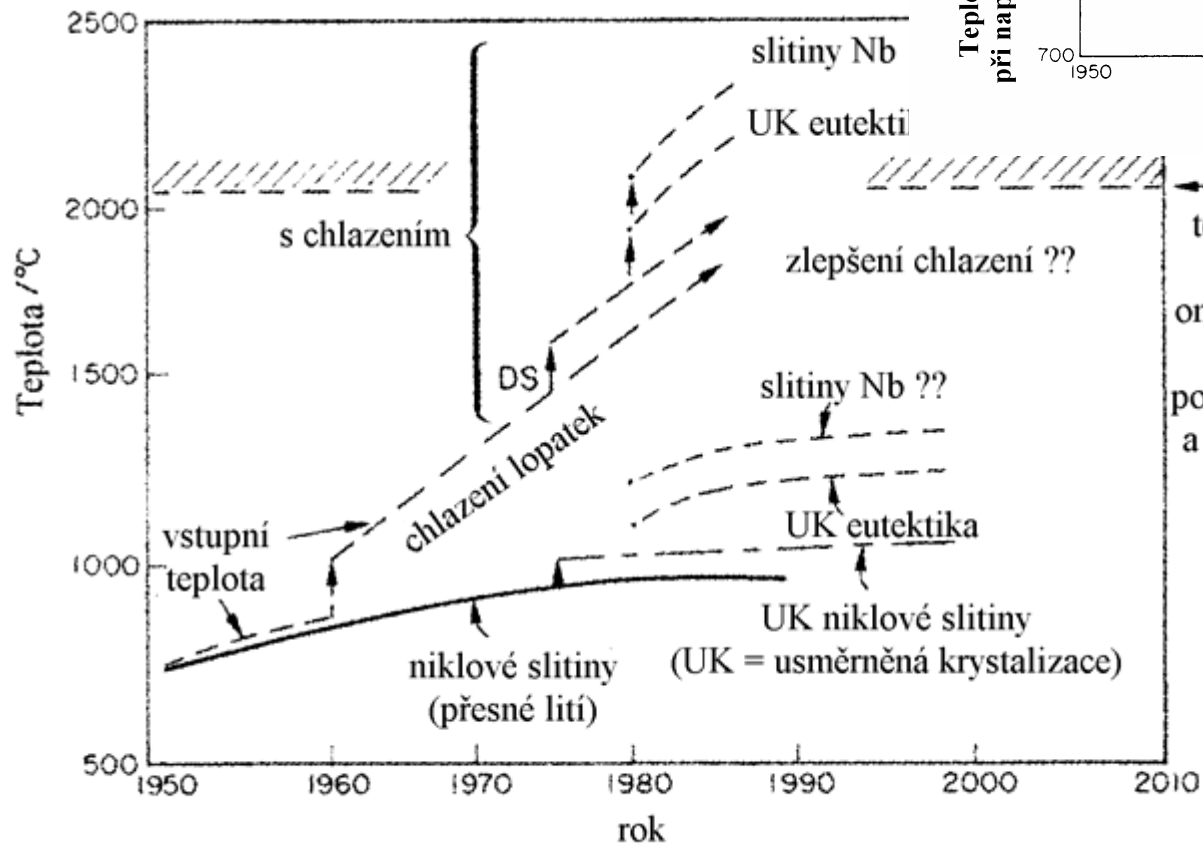
Prvek	Ni	Co	W	Cr	Al	Ta	Mo	C
hm. %	60	10	10	10	5	2,5	0,25	0,15

- a) **Co nejvíce atomů do tuhého roztoku (Co, W, Cr)**
- b) **Tvrdé stabilní částice (Ni₃Al; Ni₃Ti; MoC; TaC)**
- c) **Vytvořit na povrchu ochranný film (Cr₂O₃)**

Slitina je velice tvrdá, teplota tání 1280°C a používá se do 850°C.



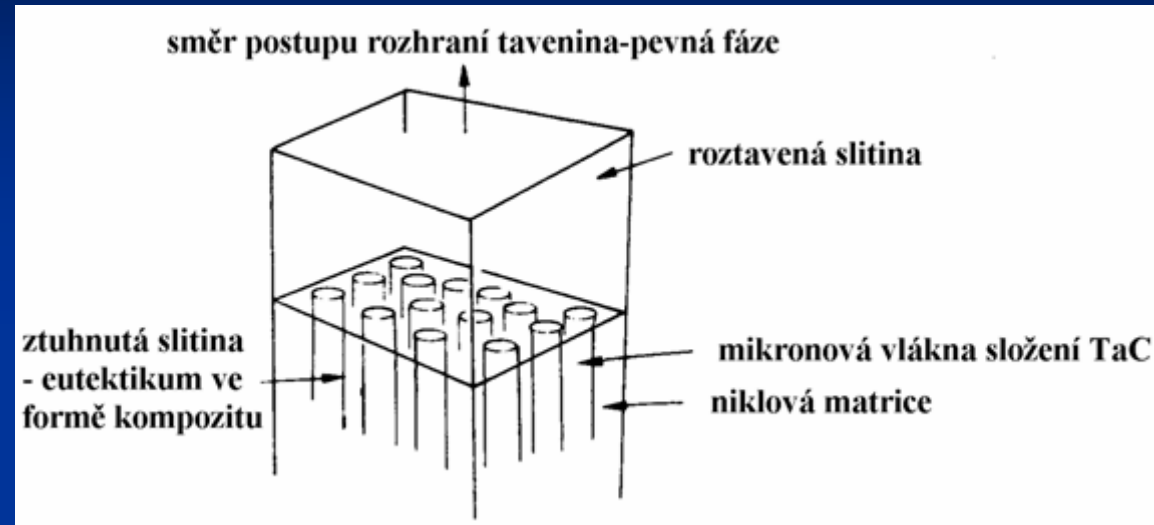




počateční omezení výkonu (je funkcí použitého paliva a složení plynu)

Jaké nové materiály?

Kompozity a
In-situ kompozity



Matrice

Ni

Co

Ni₃Al

Co

Nb

TiAlNb

vyztužující fáze

TaC

TaC

Ni₃Nb

Cr₇C₃

Nb₂C

geometrie vyztužující fáze

vlákna

vlákna

destičky

vlákna

vlákna

Spolupráce materiálového inženýra a designéra

Vývoj lopatek turbíny tryskového letadla

