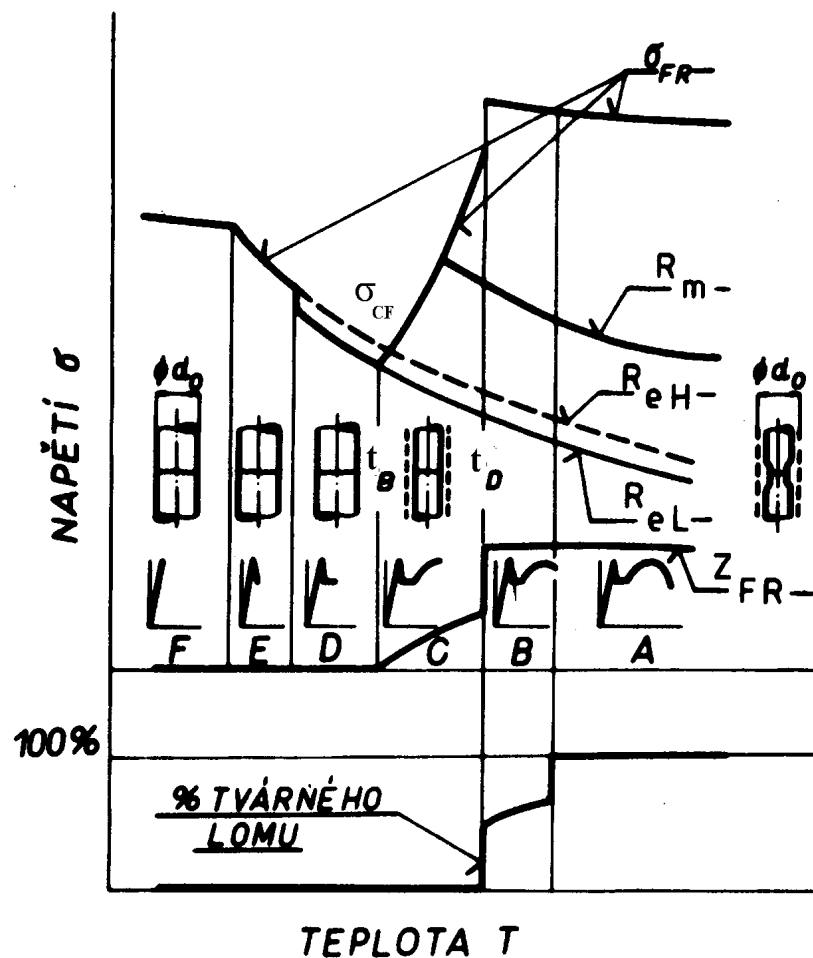


CREEP

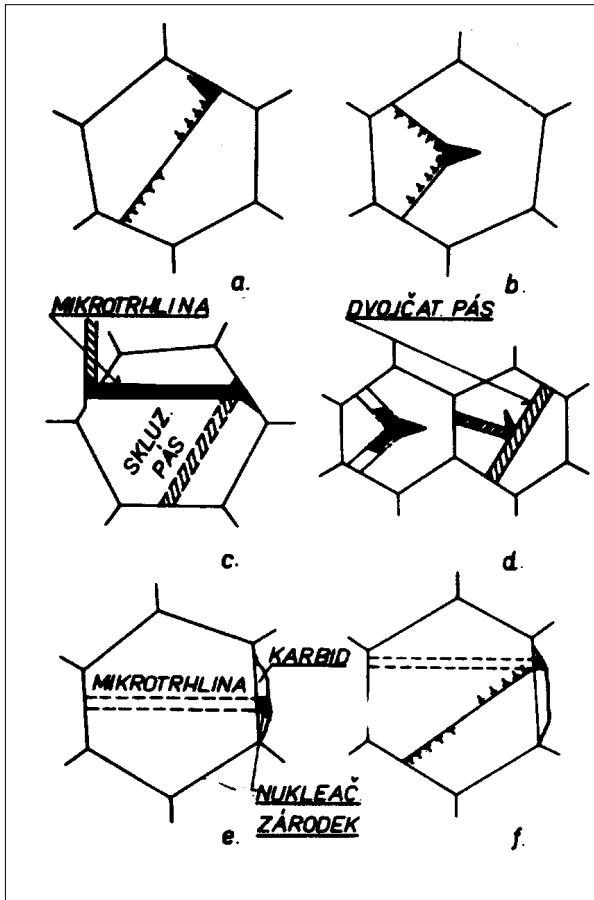
Deformace a porušování materiálů (WZ1)



Nízkouhlíková ocel

Změna tahového diagramu v intervalu teplot (20 až -269) °C

- A. Tvárný lom (houževnatý)
- B. Smíšený lom
- C. Štěpný lom
- D. Křehký lom
- E. Křehký lom
- F. Křehký lom

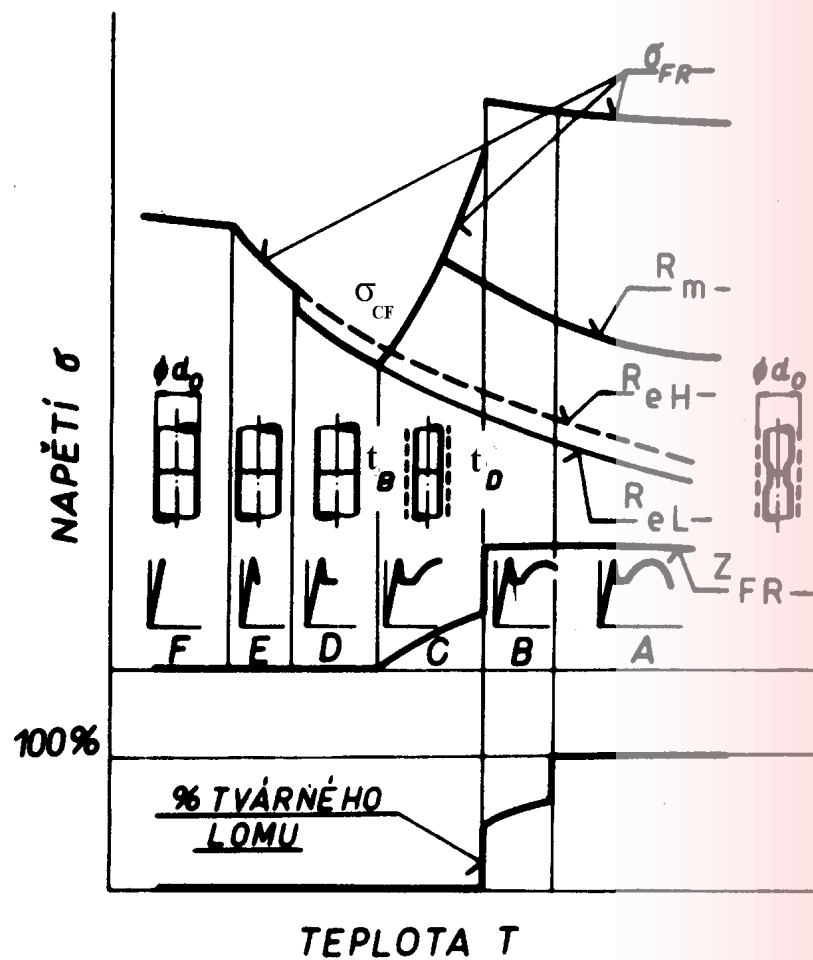


První podmínka

vzniku štěpného lomu je existence plastické deformace (podmínka nutná, nikoliv postačující!).

Druhá podmínka

vzniku štěpného lomu (šíření zárodků štěpné trhliny) dosažení kritického lomového napětí.



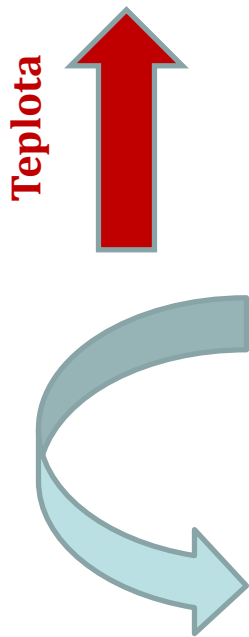
CREEP

TEPLOTA



- **Vliv zvýšených teplot na vlastnosti ocelí**
- Zkoušení creepového chování
- Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu
- Deformace a lom při creepu
- Parametry ekvivalence teploty a času

Vliv zvýšených teplot na vlastnosti (kovových) materiálů

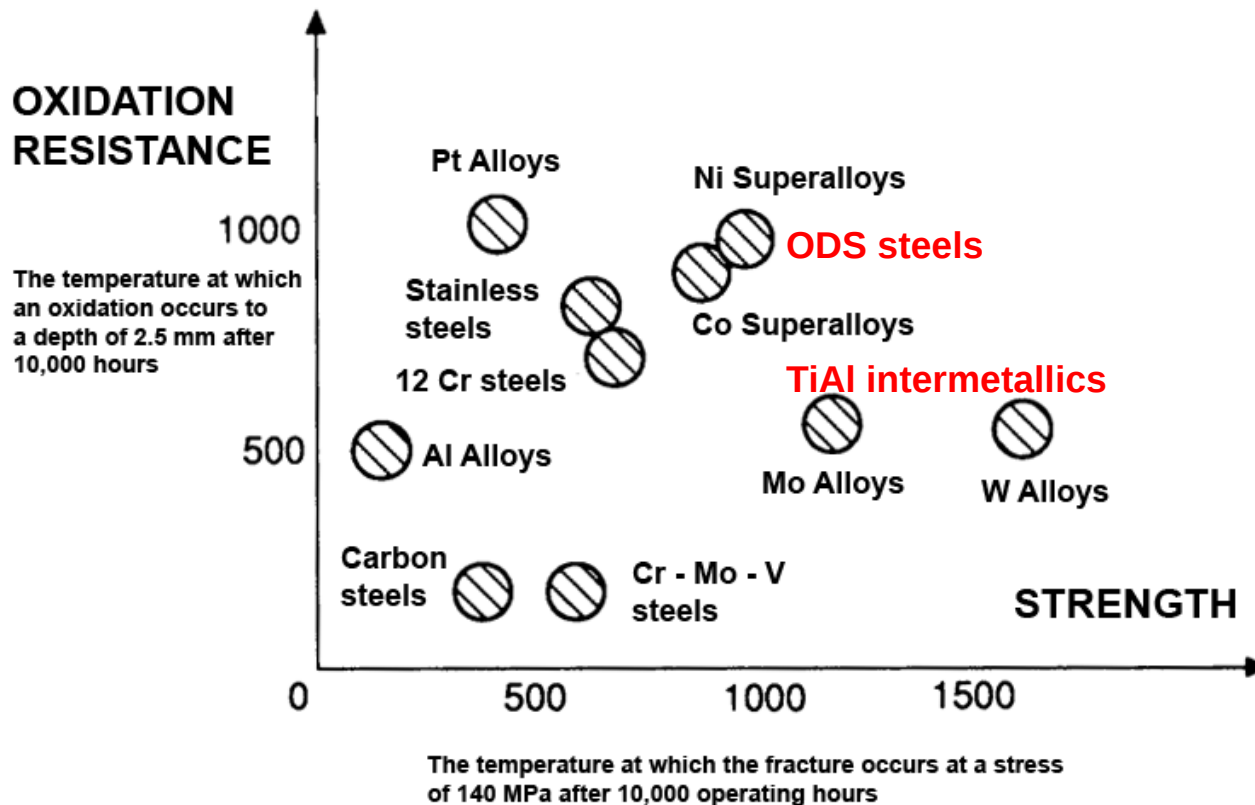


- růst vlivu difúzních procesů
- větší mobilita dislokací (šplh)
- nárůst množství vakancí v mřížce
- deformace hranic zrn
- metalurgické změny (fázové transformace, precipitace, oxidace, rekrystalizace, ...)

Vysokoteplotní materiály (slitiny)

- Odpovídající pevnostní charakteristiky.
- Dostatečná odolnost proti oxidaci.

Vliv zvýšených teplot na vlastnosti (kovových) materiálů

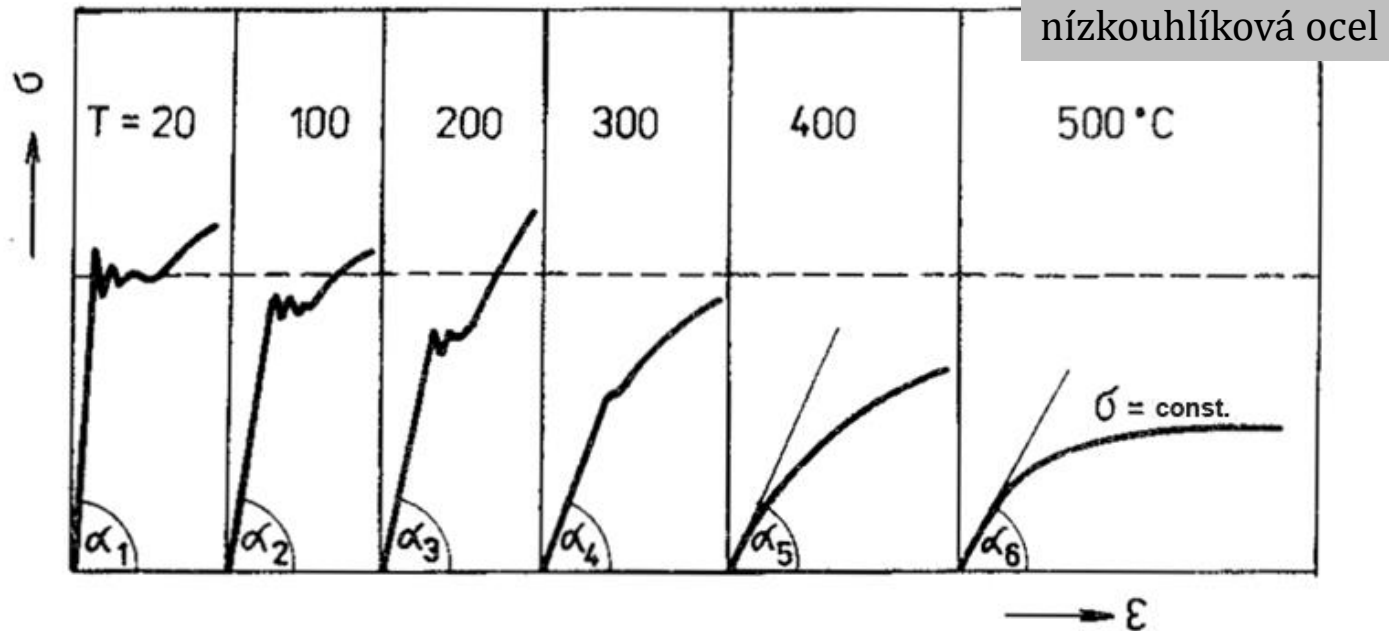


Vliv zvýšených teplot na vlastnosti (kovových) materiálů



nízkouhlíková ocel
(boiler, tlak 9,1 MPa)

Vliv zvýšených teplot na vlastnosti (kovových) materiálů



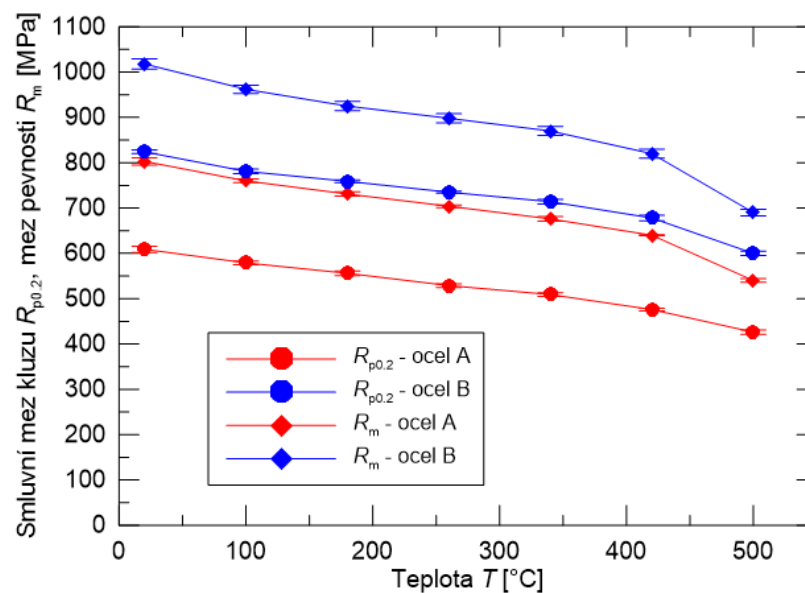
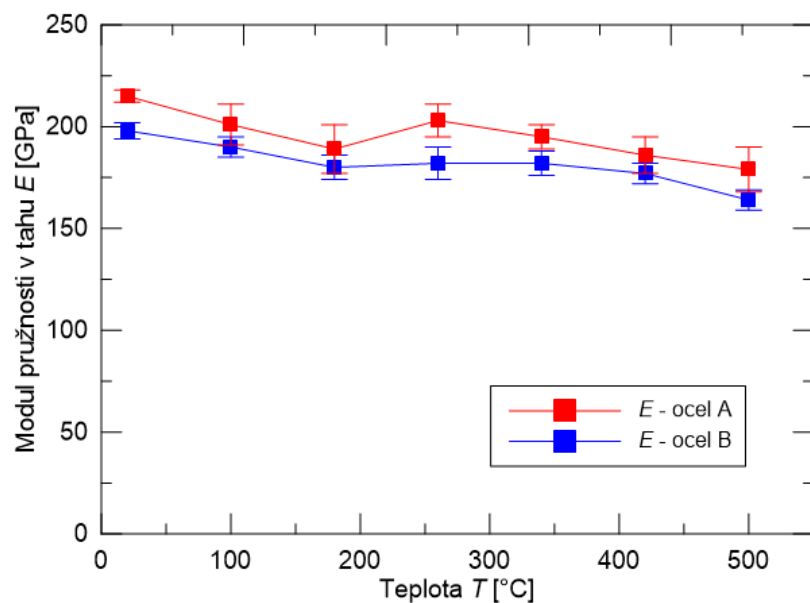
Teplota $< 350^\circ\text{C}$

- výrazná mez kluzu postupně mizí
- snižování úrovně meze kluzu (R_e)
- deformace se realizuje pohybem dislokací

Teplota $> 350^\circ\text{C}$

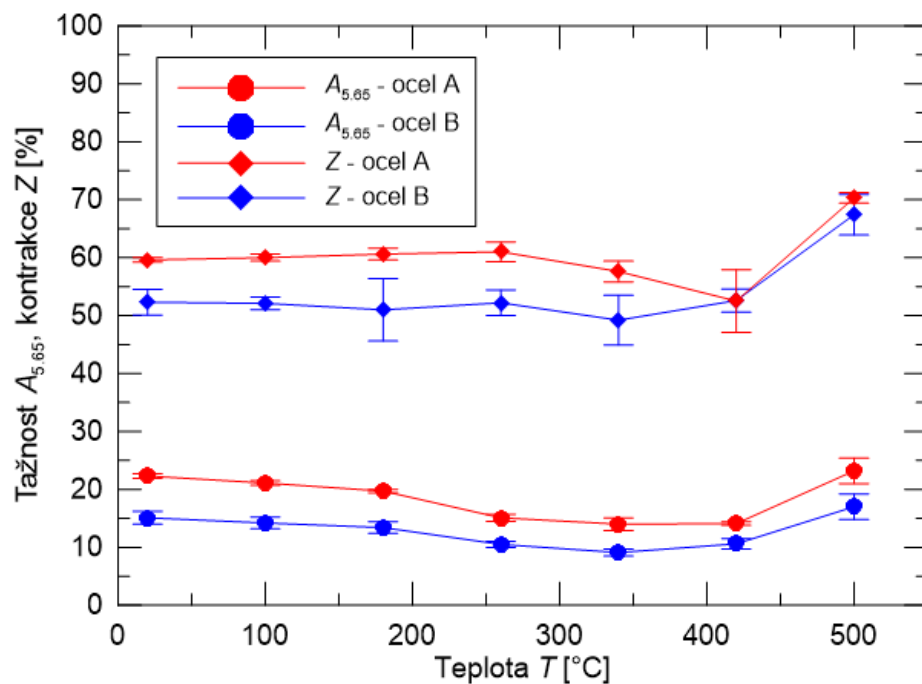
- výrazná mez kluzu zaniká
- tvar tahového diagramu je výrazně ovlivněn teplotou (a rychlostí zatěžování)
- deformace se realizuje difúzí atomů $\rightarrow$ jev označovaný jako **TEČENÍ \ CREEP**

Vliv zvýšených teplot na vlastnosti (kovových) materiálů



ocel **X22CrMoV12-1 (A)**
X11CrNiMo12 (B)

Vliv zvýšených teplot na vlastnosti (kovových) materiálů



ocel

X22CrMoV12-1 (A)

X11CrNiMo12 (B)

Co je creep?

Deformace

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


Creep

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

- Creep je pomalá plastická deformace materiálu způsobená dlouhodobou teplotní expozicí
- Ke creepu dochází, jestliže je materiál vystavený konstantnímu tahovému zatížení za zvýšených teplot

Co je creep?

Při jakých teplotách dochází ke creepu?

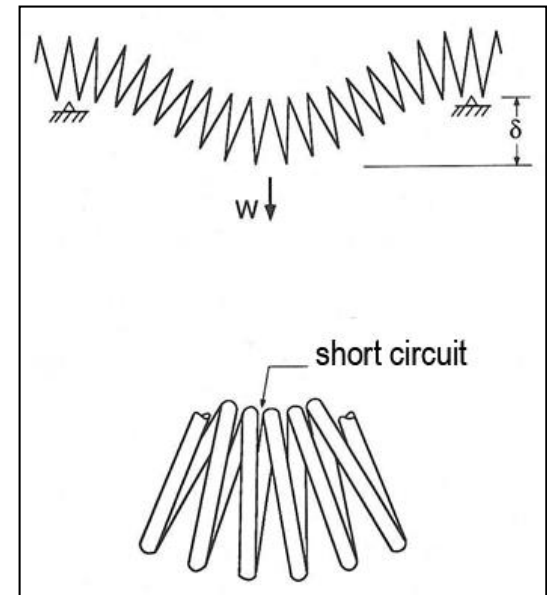
Creep je významný za **homologických teplot** $> 0.3 \div 0.5$ (výjimkou jsou Ni superslitiny ≈ 0.75)

$$\text{Homologická teplota} = \frac{\text{Teplota zkoušky}}{\text{Teplota tavení}}$$

Nízkouhlíkové oceli ($HT \approx 0.3$, tj. přibližně 350°C)

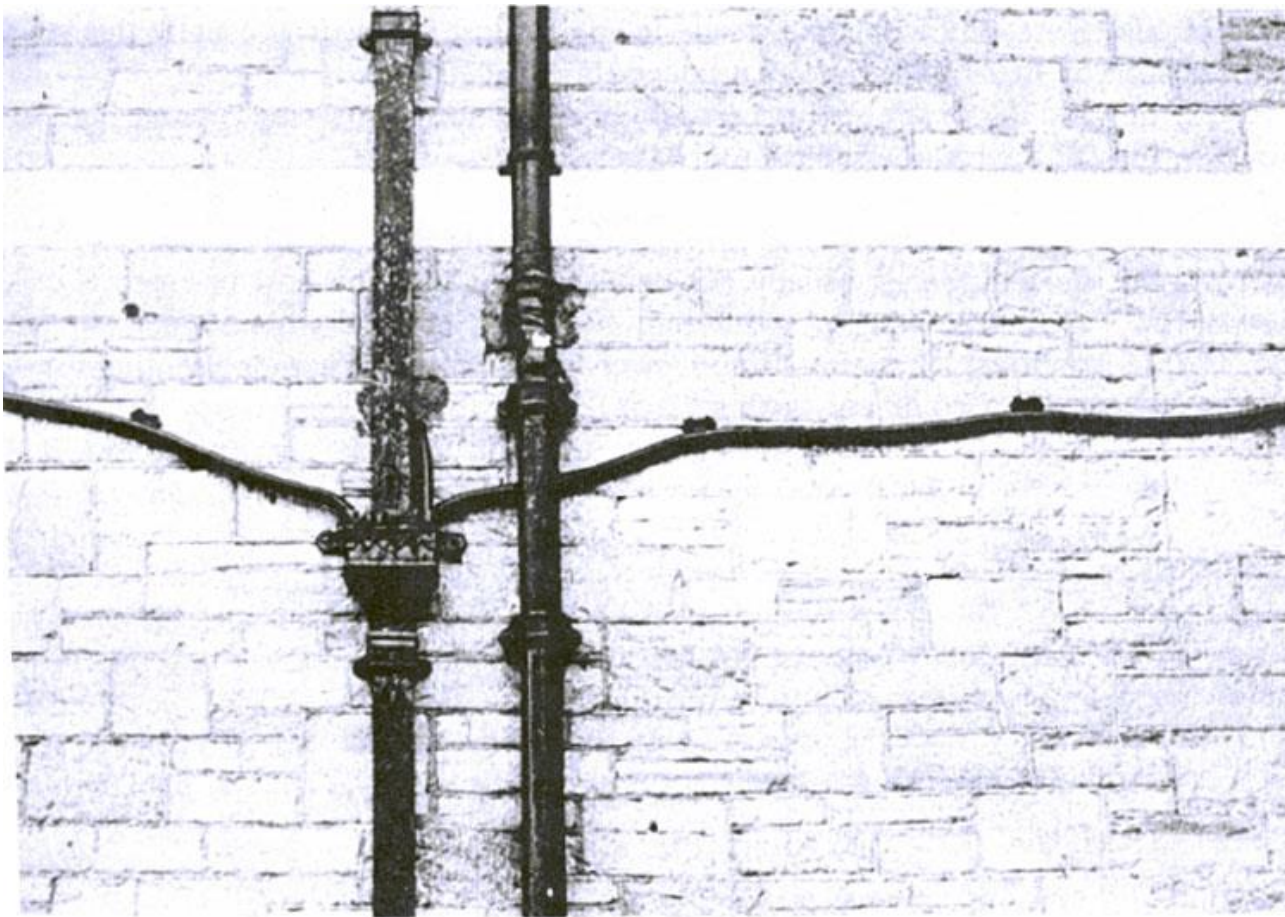


Parní turbína:	$\approx 550^\circ\text{C}$
Turbodmychadlo:	$\approx 850^\circ\text{C}$
Vlákno žárovky:	$\approx 2000^\circ\text{C}$



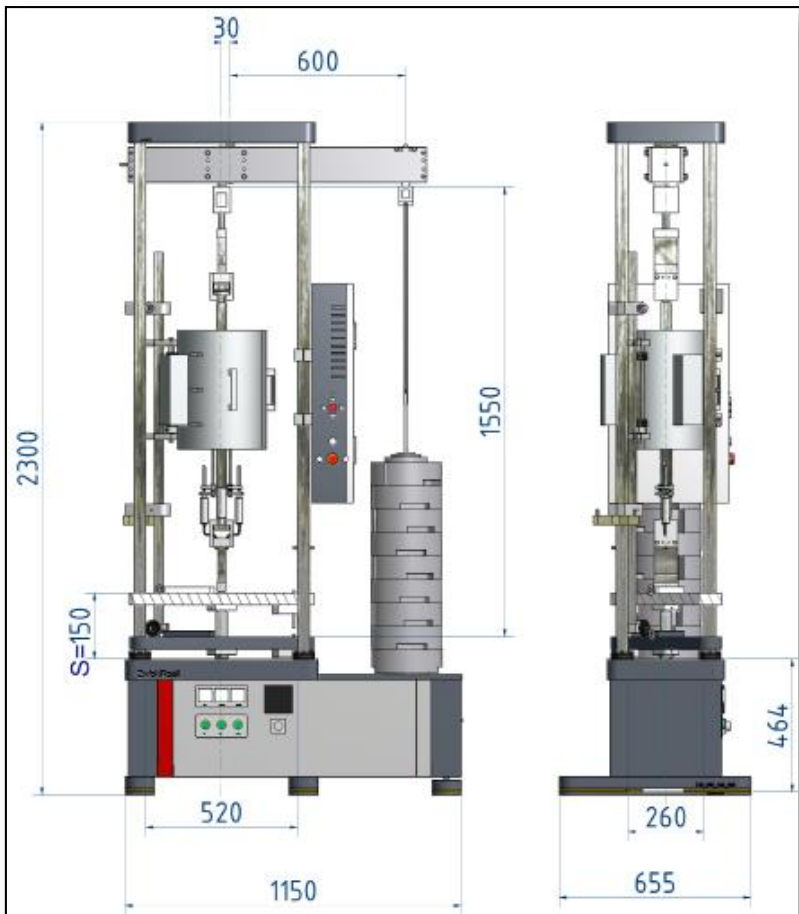
material	T_m/K	T_{max}/K	T_{max}/T_m
aluminium alloys	933	450	0.48
magnesium alloys	923	450	0.49
ferritic steels	1 811	875	0.48
titanium alloys	1 943	875	0.45
nickel-base superalloys	1 728	1 300	0.75
Al_2O_3	2 323	1 200	0.52
SiC	3 110	1 650	0.53

Co je creep?



- Teplotní závislost pevnostních vlastností
- Vliv zvýšených teplot na vlastnosti ocelí
- **Zkoušení creepového chování**
- Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu
- Deformace a lom při creepu
- Parametry ekvivalence teploty a času

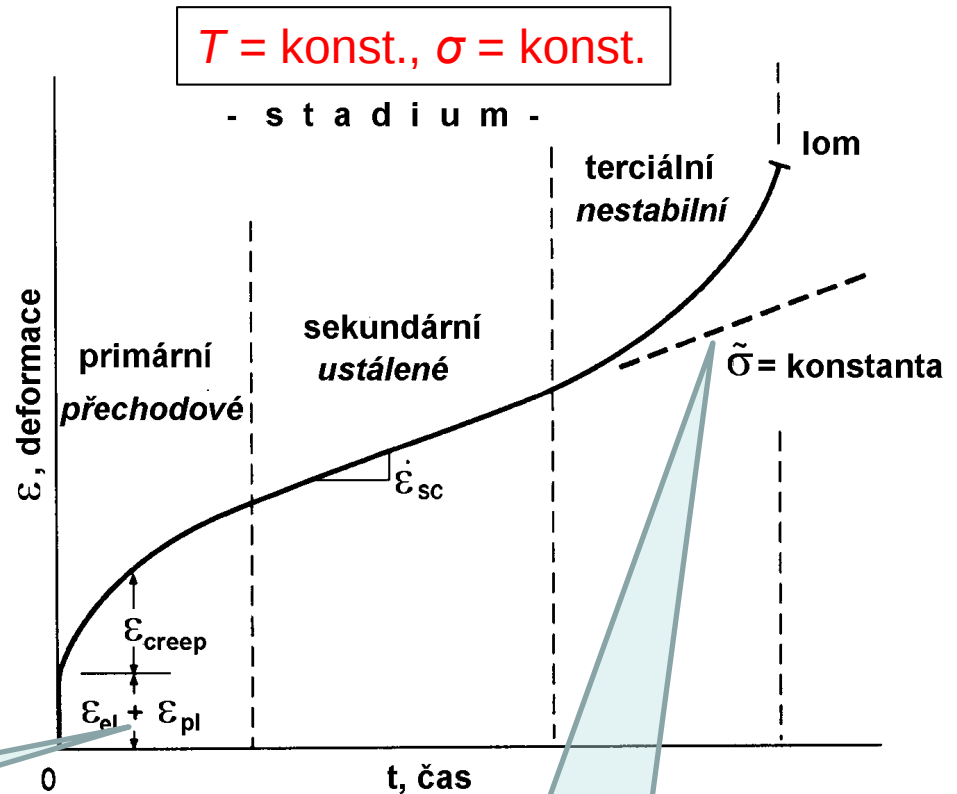
Zkoušky creepového chování



Zkoušky creepového chování

Zajímá nás (měří se):

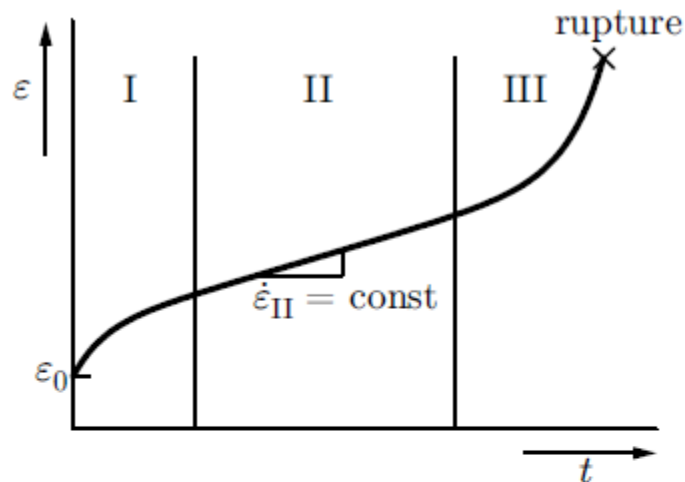
- deformace v závislosti na čase
- doba do lomu



Částečně vratná (anelastická) a nevratná (plastická) okamžitá deformace vzniká v okamžiku aplikování zatížení

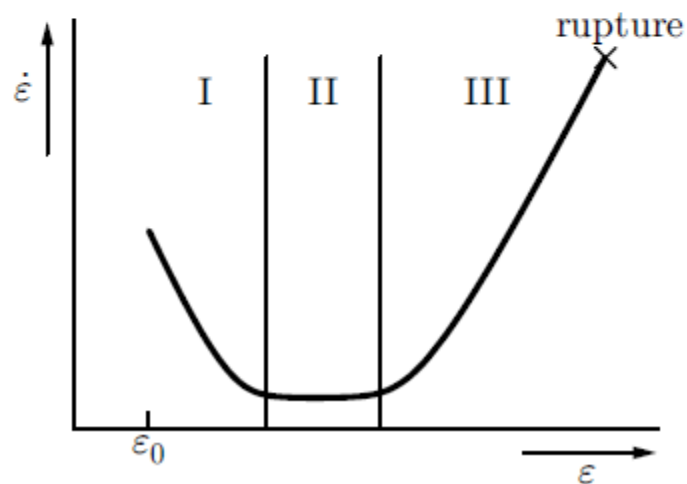
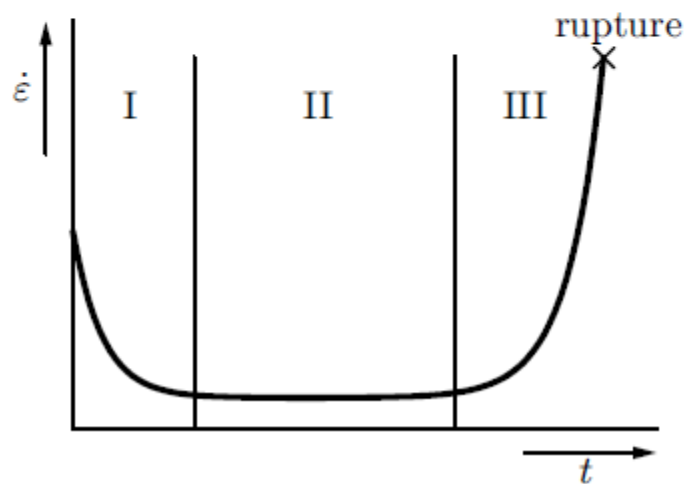
Křivka při měření závislosti deformace – čas v režimu konstantního napětí

Zkoušky creepového chování

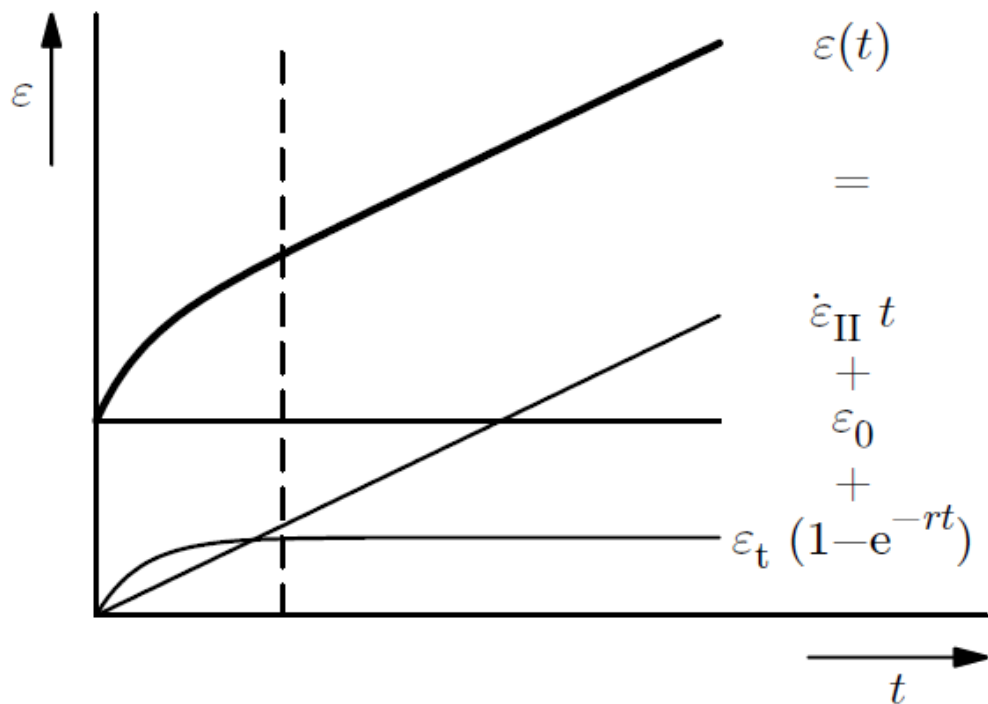


- I. Primární creep** – rychlost creepu klesá
- II. Sekundární creep** – rychlost creepu je konstantní (*steady state*)
- III. Terciární creep** – rychlost creepu roste; stádium zakončené lomem

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_t(1 - e^{-rt}) + \dot{\varepsilon}_{II}t$$

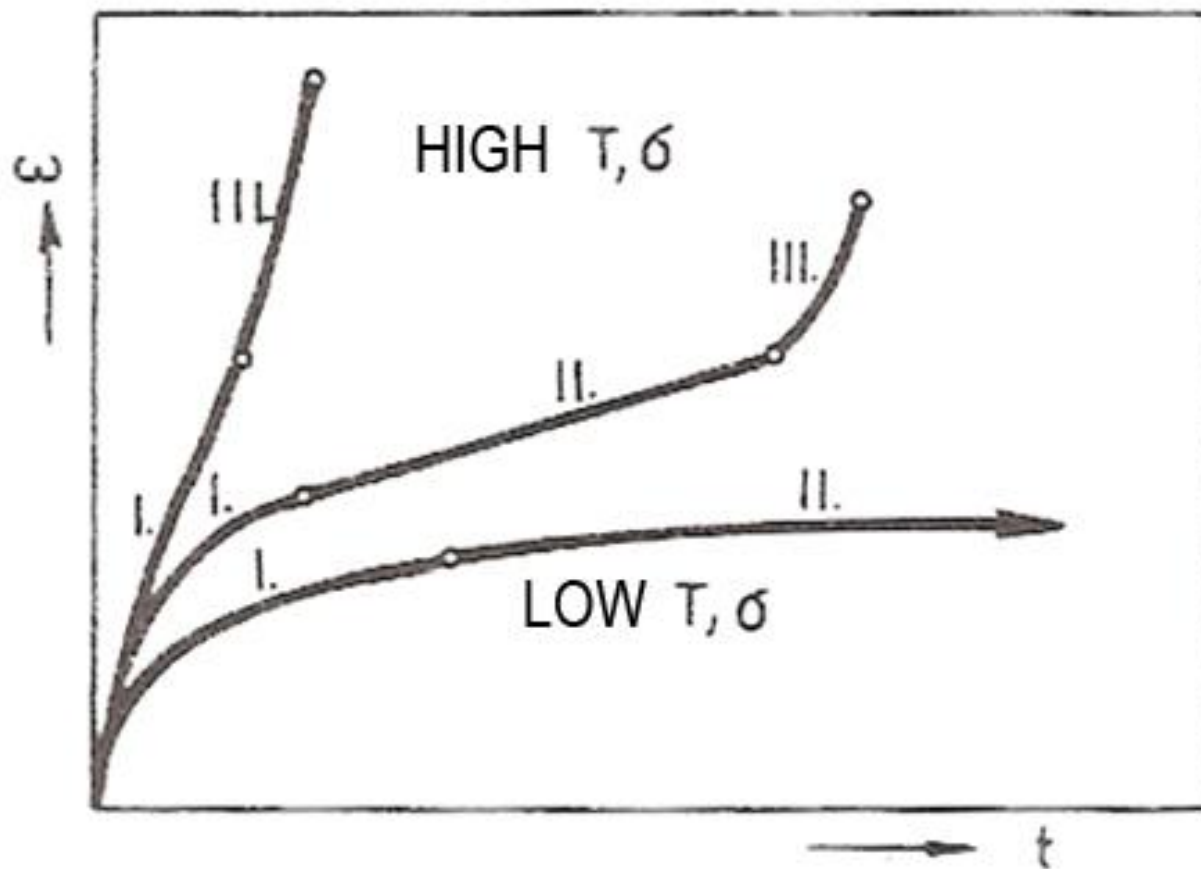


Zkoušky creepového chování

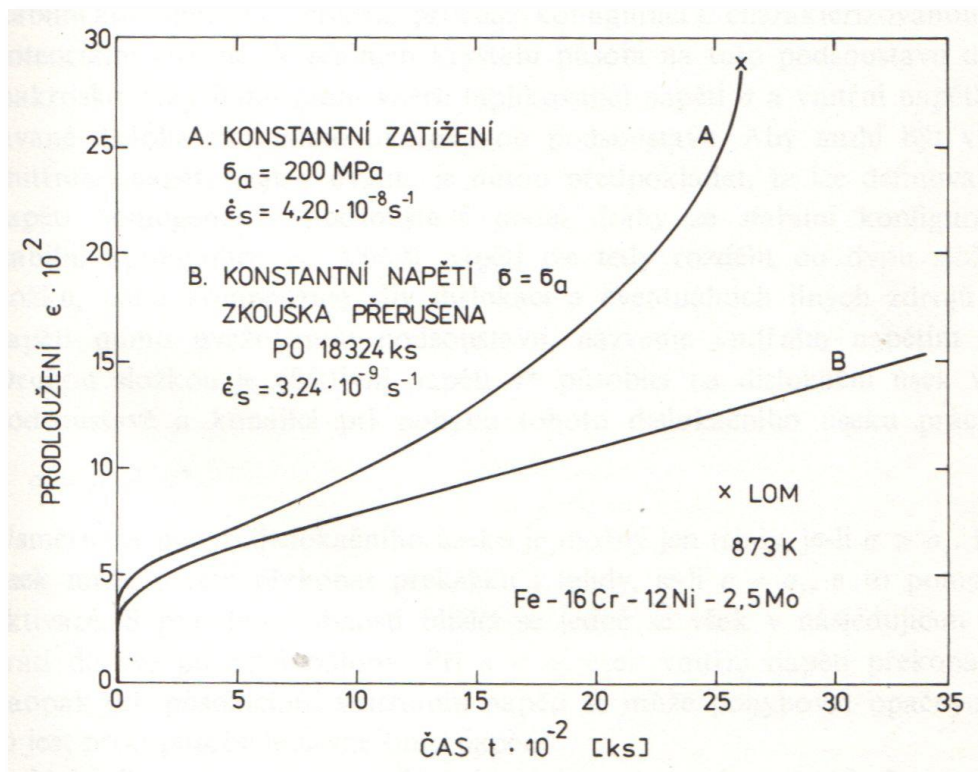


$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_t (1 - e^{-rt}) + \dot{\varepsilon}_{II} t$$

Zkoušky creepového chování

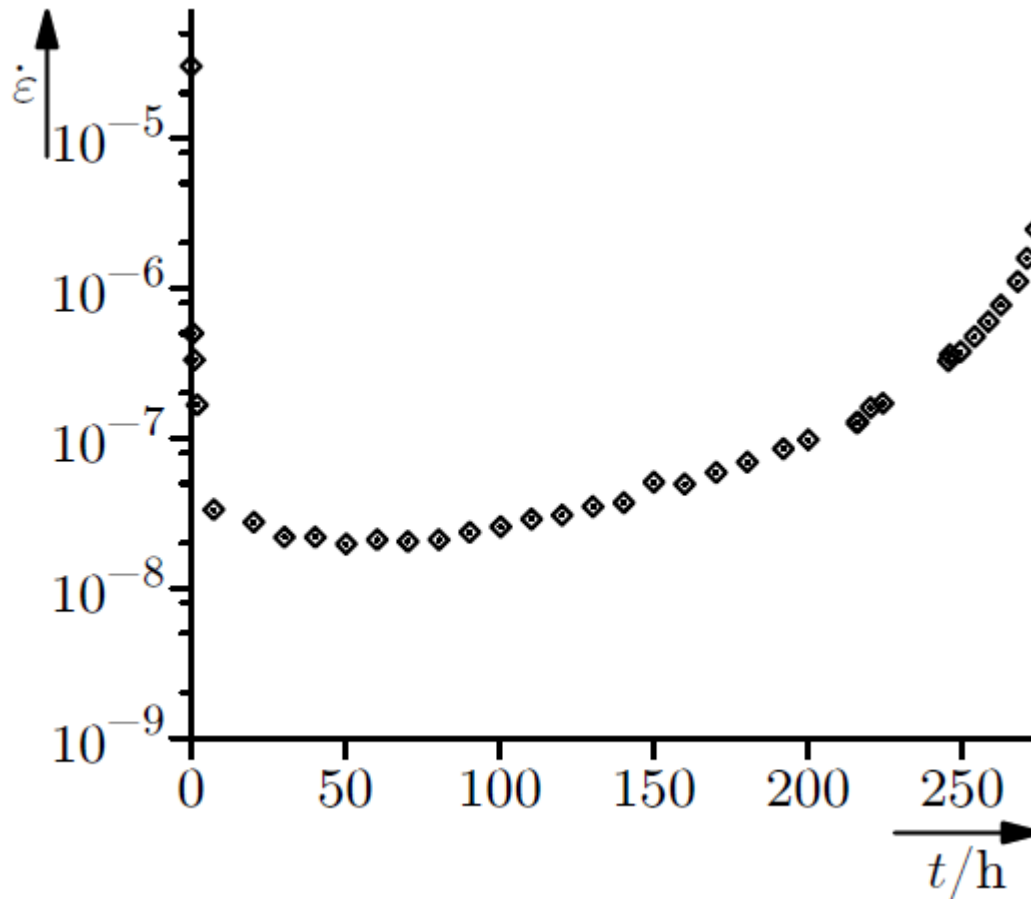


Zkoušky creepového chování



Austenitická ocel
 16Cr - 12 Ni - 2,5 Mo

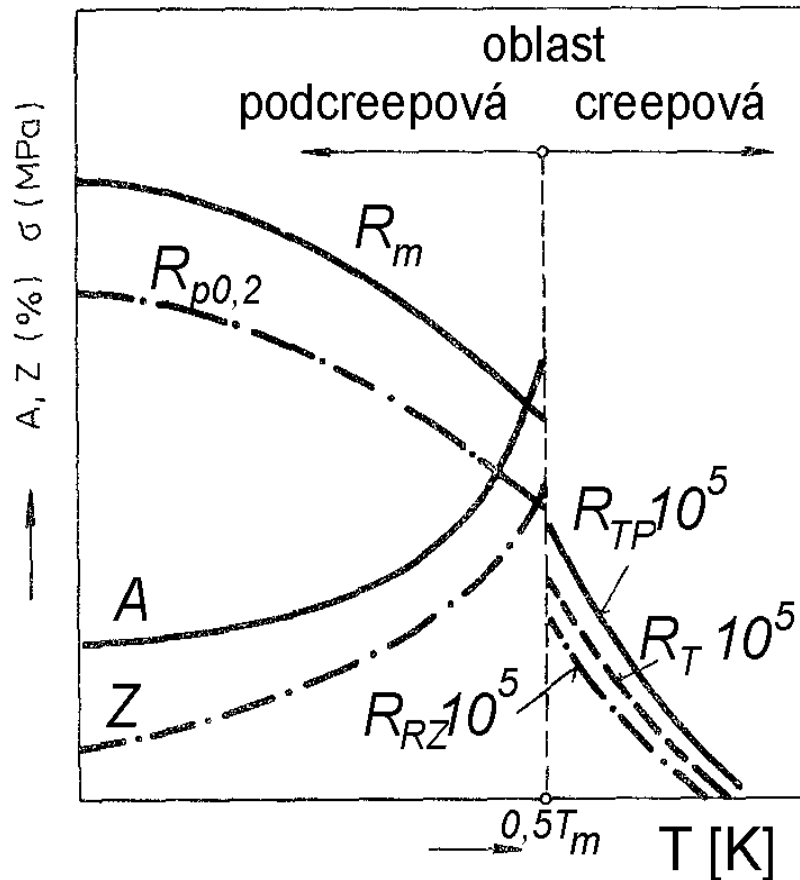
Zkoušky creepového chování



Ni superalloy

- Teplotní závislost pevnostních vlastností
- Vliv zvýšených teplot na vlastnosti ocelí
- Zkoušení creepového chování
- **Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu**
- Deformace a lom při creepu
- Parametry ekvivalence teploty a času

Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu



Budou nás zajímat:

- ✓ Mez pevnosti při tečení
- ✓ Mez tečení
- ✓ Charakteristiky relaxace
- ✓ Čas do lomu
- ✓ Rychlost ustáleného creepu
- ✓ Parametry ekvivalence teploty a času

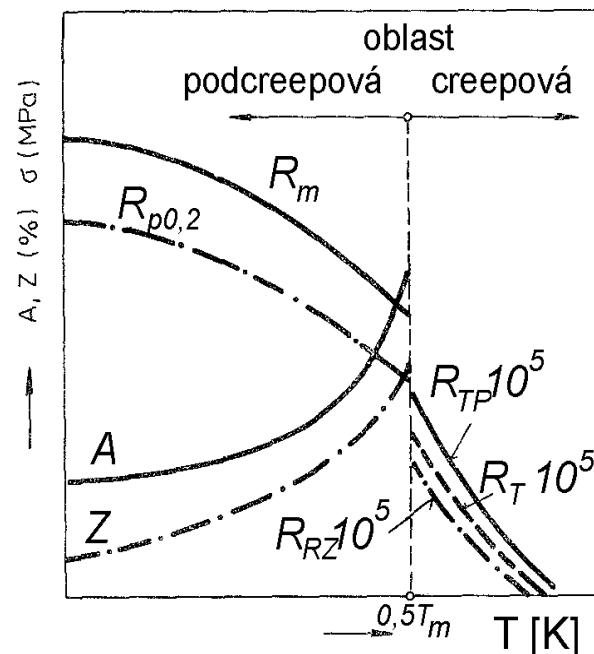
Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu

Mez pevnosti při tečení R_{TP} (σ_r) [MPa]
teplota / čas do lomu

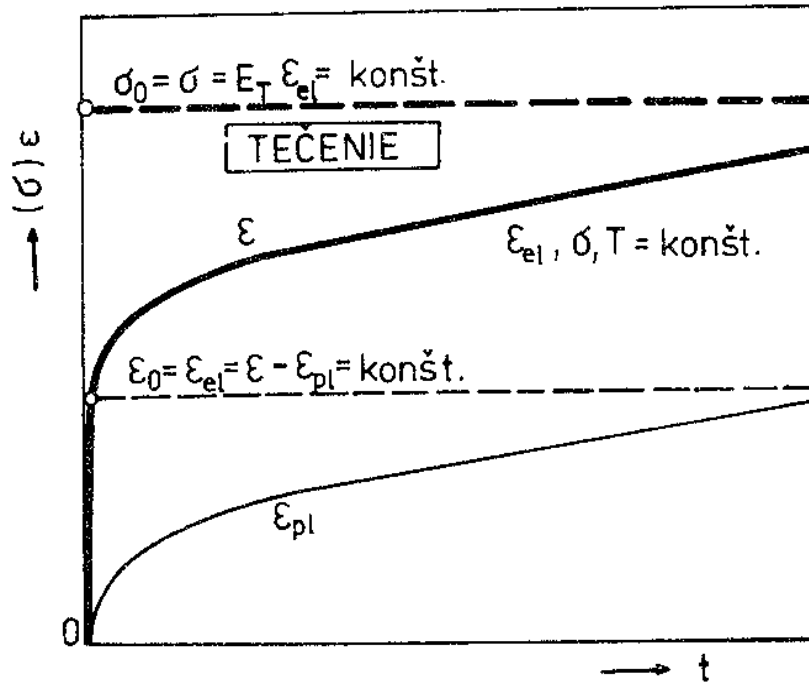
Příklad: ocel P265H (11 418); $R_e=265$ MPa, $R_m=450$ MPa
 $R_{TP}=165/380/10^5 \sim \langle \text{MPa} / ^\circ\text{C}/\text{hod.} \rangle$

Mez tečení R_T (σ_{A1}) [MPa]
teplota / velikost deformace/čas deformace

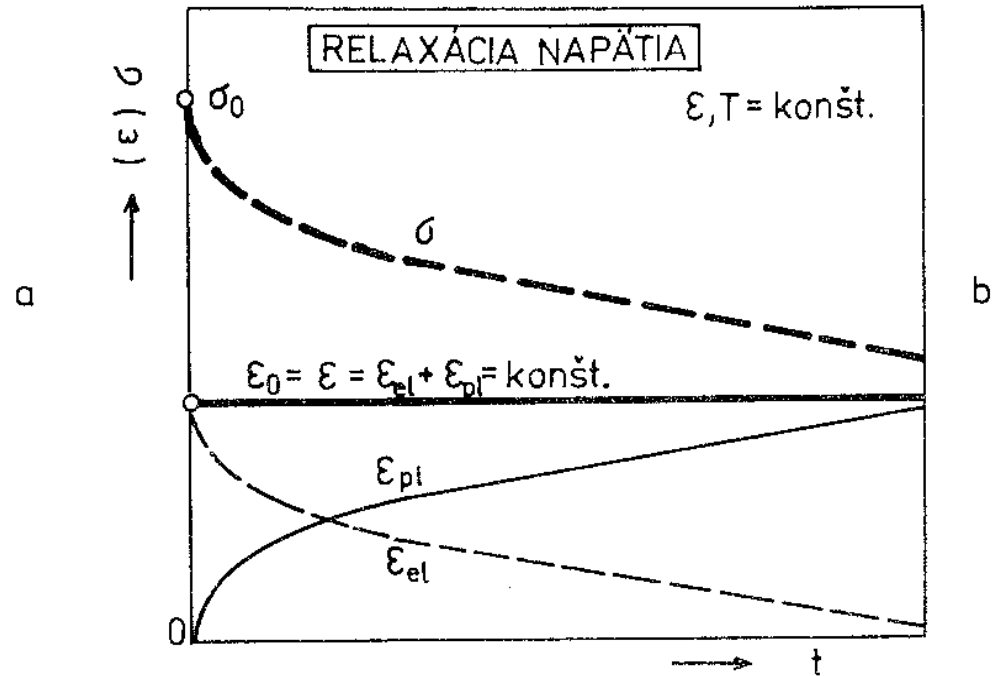
Příklad: ocel P265H (11 418); $R_e=265$ MPa, $R_m=450$ MPa
 $R_{TP}=132/380/1/10^5 \sim \langle \text{MPa} / ^\circ\text{C}/\%/ \text{hod.} \rangle$



Zkoušky creepového chování



Měkké zatížení (potrubí, ...)



Tvrde zatížení (šrouby, ...)

Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu

Relaxace

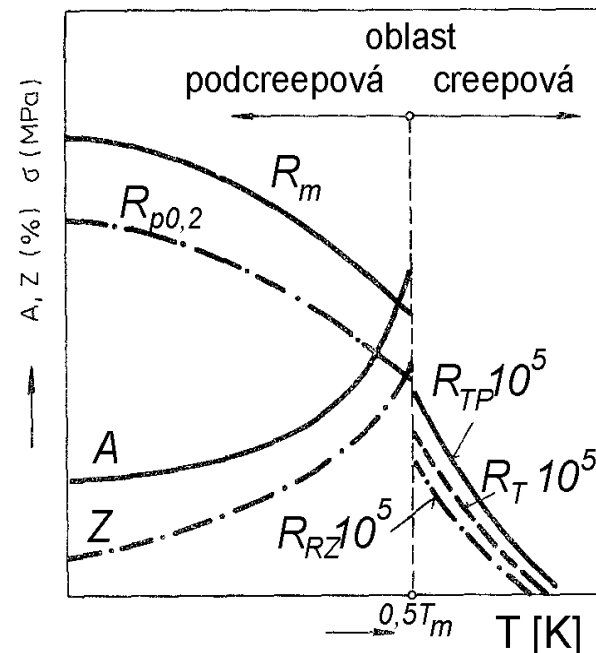
Výchozí napětí R_R [MPa]
teplota

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

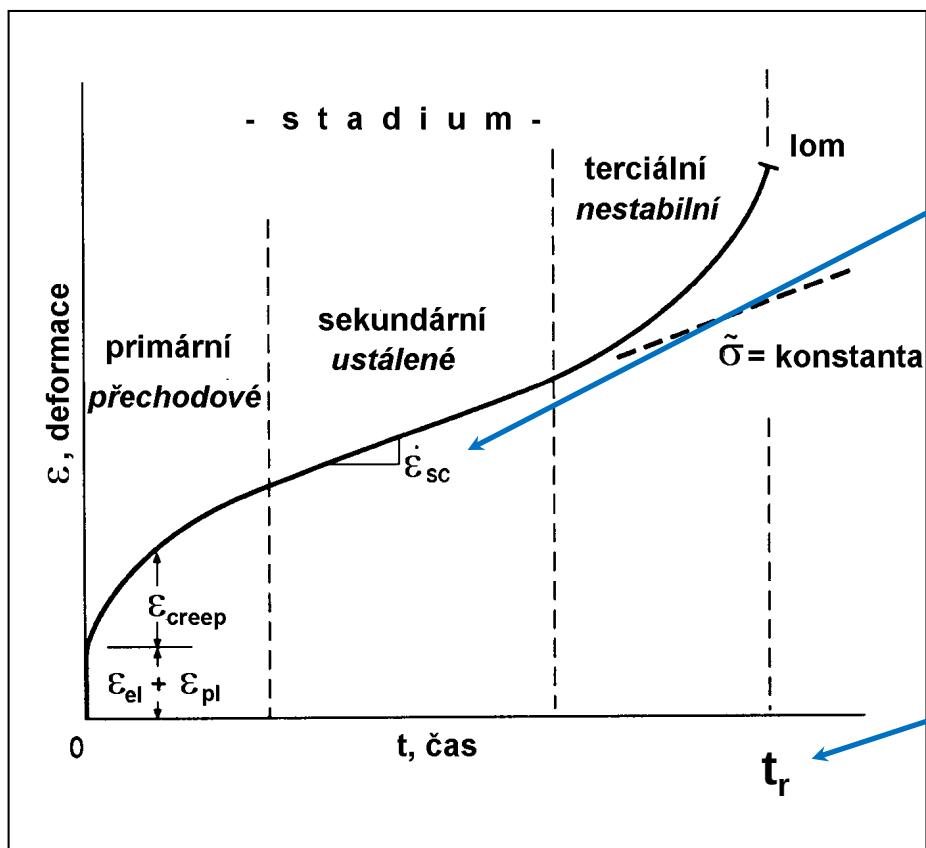
Příklad: ocel 13CrMo4-5 (15 121)
 $R_R = 140/500 \sim \langle \text{MPa} / ^\circ\text{C} \rangle$
 $R_{RZ} = 10/500/2 \cdot 10^3 \sim \langle \text{MPa} / ^\circ\text{C}/\text{hod.} \rangle$

Mez relaxace R_R [MPa]
čas / $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ / teplota

Příklad: ocel 13CrMo4-5 (15 121)
 $R_R \cdot 10^4 / 5 / 580 = 90 \sim \langle \text{hod.} / \%/^\circ\text{C}; \text{MPa} \rangle$



Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu

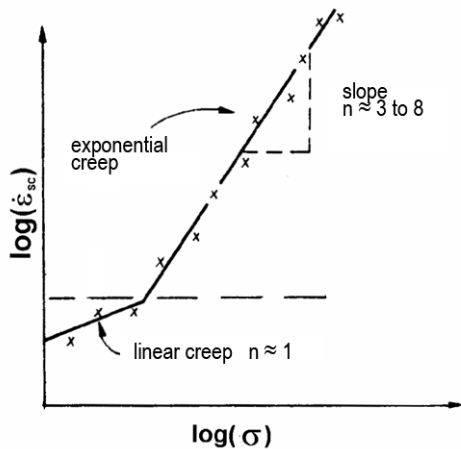


Rychlost ustáleného creepu
směrnice závislosti ε vs. t
v sekundárním stádiu creepu
(*steady-state rate*)

$$\dot{\varepsilon}_{sc} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

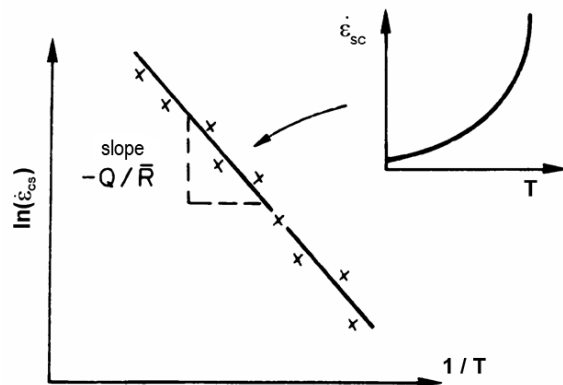
Čas do lomu
pro dané podmínky zatěžování

Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu



Závislost $\log(\dot{\epsilon}_{sc})$ vs. $\log(\sigma)$; $T = \text{konst.}$

$$\dot{\epsilon}_{sc} = B\sigma^n$$



Závislost $\ln(\dot{\epsilon}_{sc})$ vs. $1/T$; $\sigma = \text{konst.}$

$$\dot{\epsilon}_{sc} = C \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Arrheniova rovnice

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

kde

n – exponent creepu

R – univ. plyn. konstanta: 2 cal/kmol

T – teplota v [K]

Q – aktivační energie [cal/mol]

A – materiálová konstanta

- Teplotní závislost pevnostních vlastností
- Vliv zvýšených teplot na vlastnosti ocelí
- Zkoušení creepového chování
- Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu
- **Deformace a lom při creepu**
- Parametry ekvivalence teploty a času

Deformace a lom při creepu

Creep je způsoben difúzí atomů pod vlivem napětí a zvýšené teploty.

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

$$n \approx 1$$

$$n \approx 1$$

$$n = 3 \div 8$$

creep polymerů

difúzní creep

dislokační creep

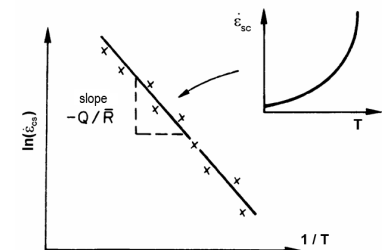
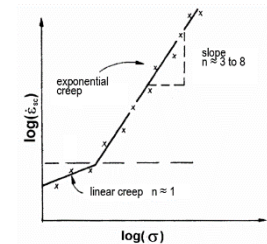
Kovové materiály

DIFÚZNÍ CREEP

Tok vakancí a intersticiálů krystalovou mřížkou pod vlivem aplikovaného napětí

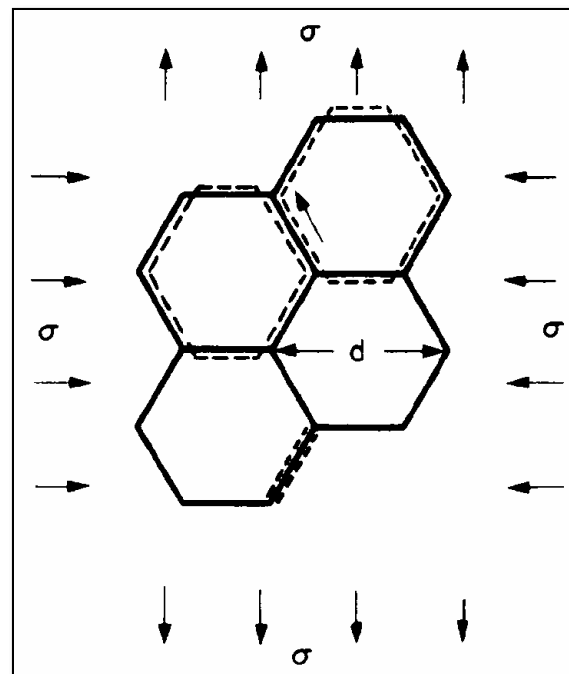
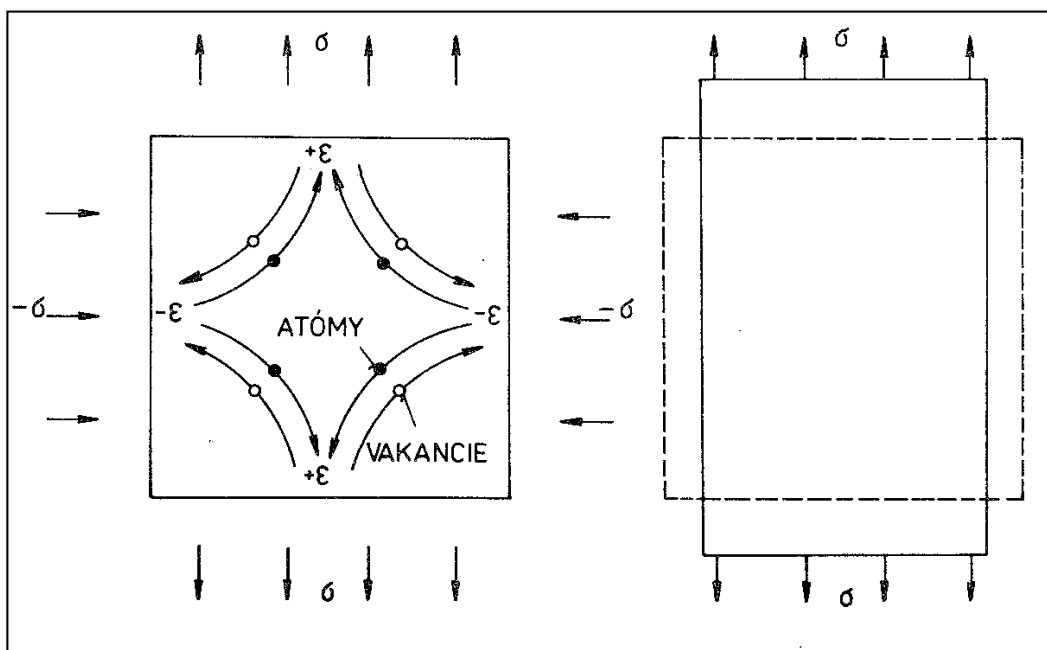
DISLOKAČNÍ CREEP

Pohyb dislokací; bariéry překonávány pomocí difúzních mechanismů (vakance, intersticiály)

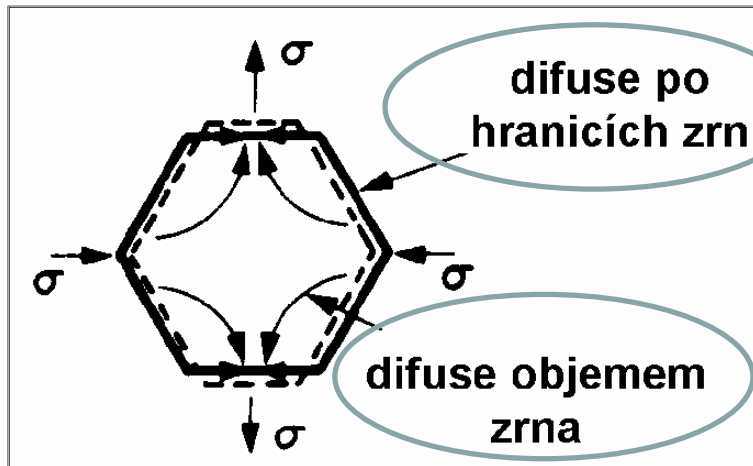


Deformace a lom při creepu

DIFÚZNÍ CREEP



Deformace a lom při creepu – difúzní creep



Coble creep

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

nižší napětí,
nižší teplota

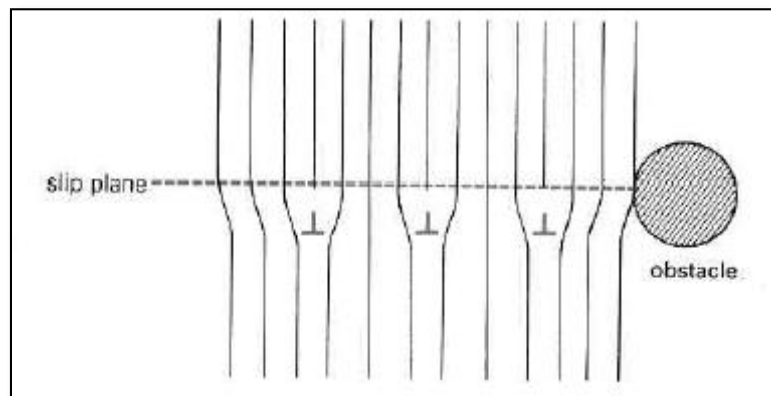
Herring-Nabarro creep

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

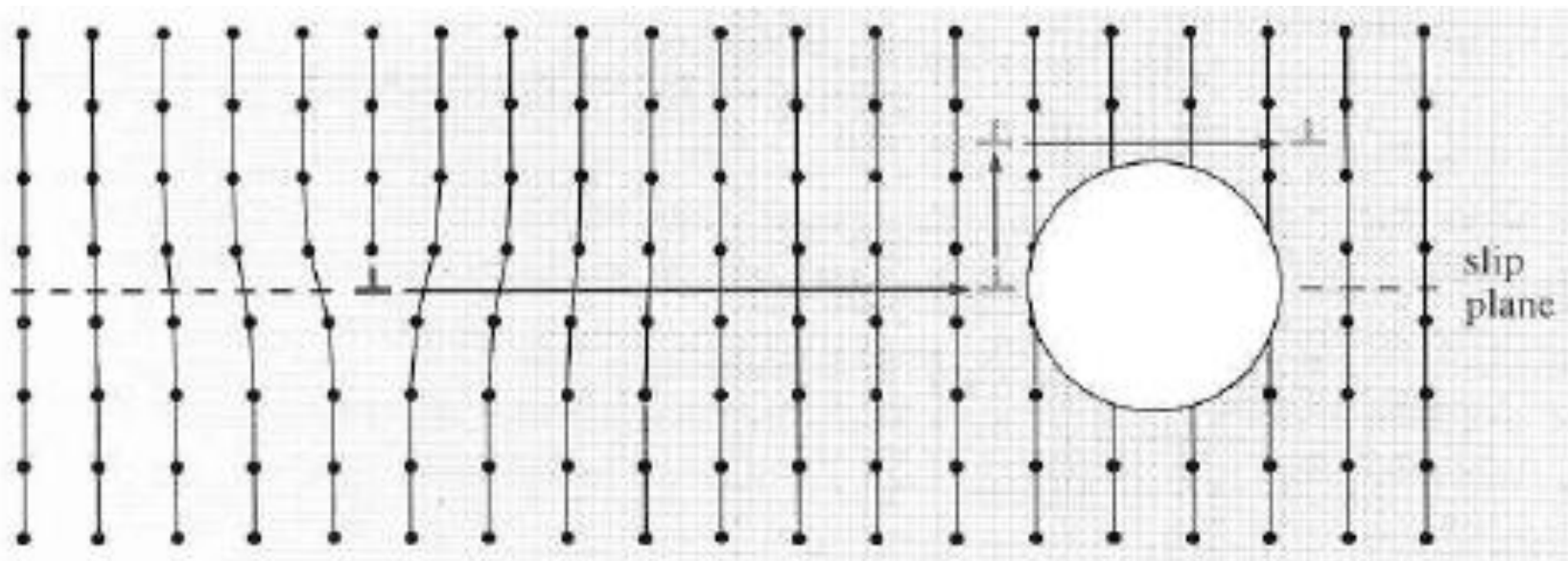
nižší napětí,
vysoká teplota

Deformace a lom při creepu

DISLOKAČNÍ CREEP

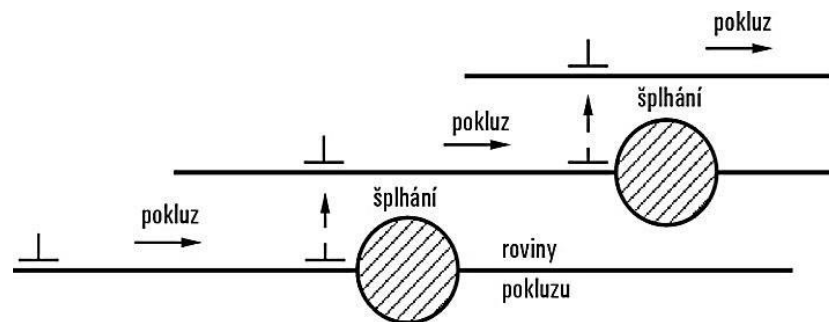
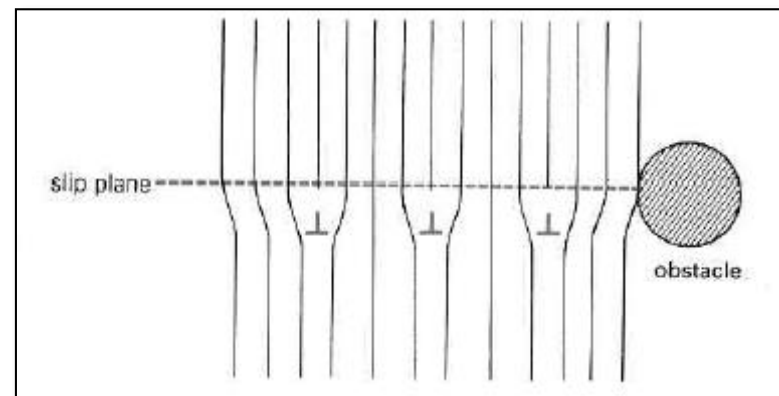
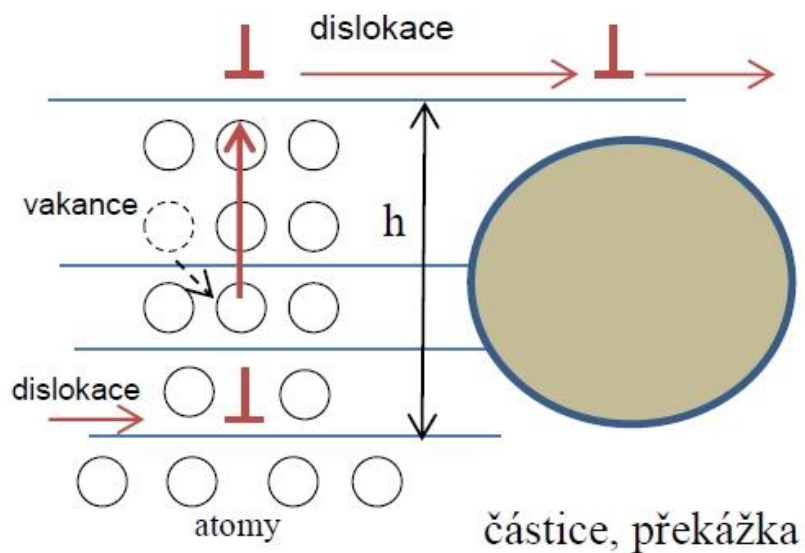


šplh dislokací

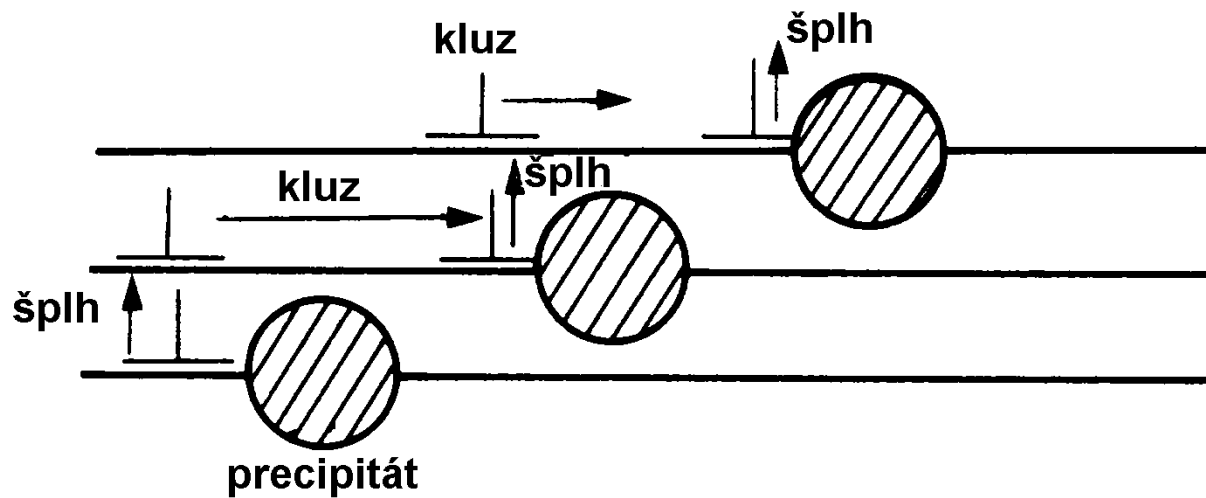


Deformace a lom při creepu

DISLOKAČNÍ CREEP



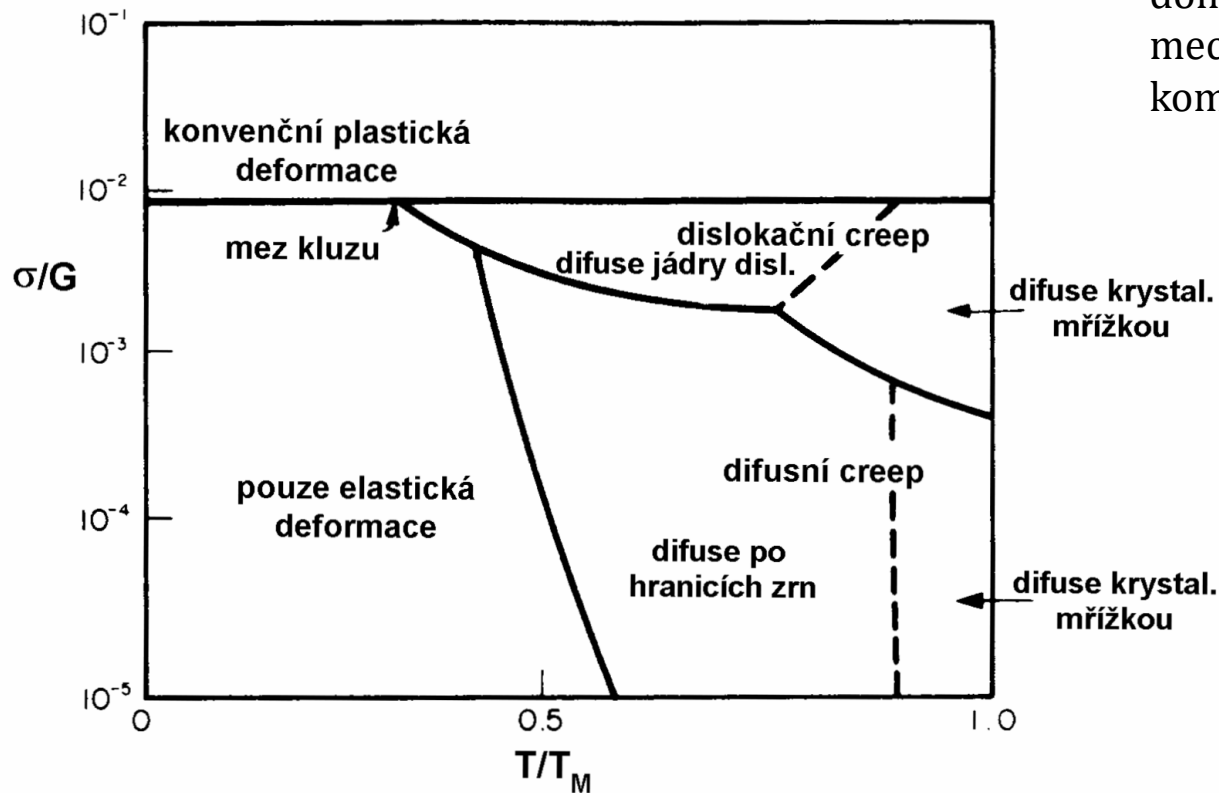
Deformace a lom při creepu – dislokační creep



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

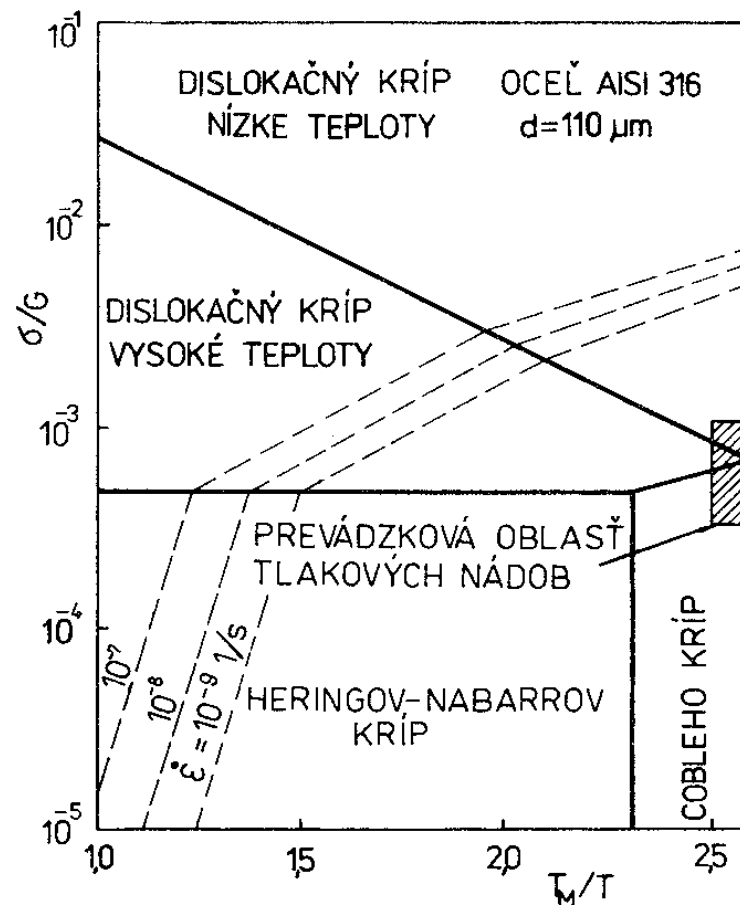
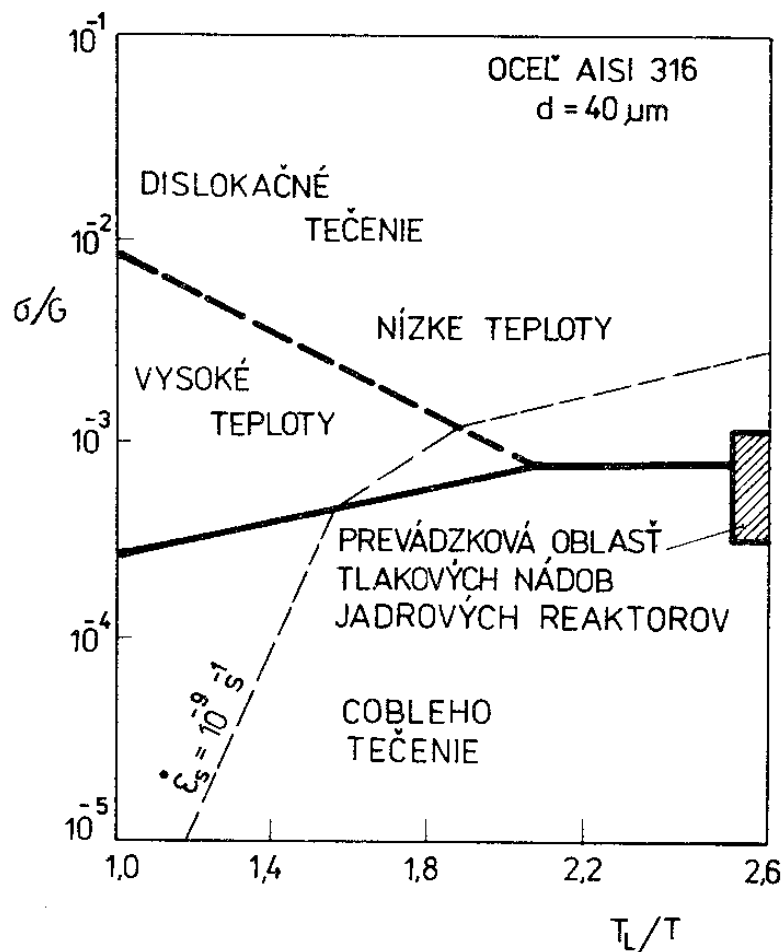
Deformace a lom při creepu

MAPY DEFORMAČNÍCH MECHANISMŮ

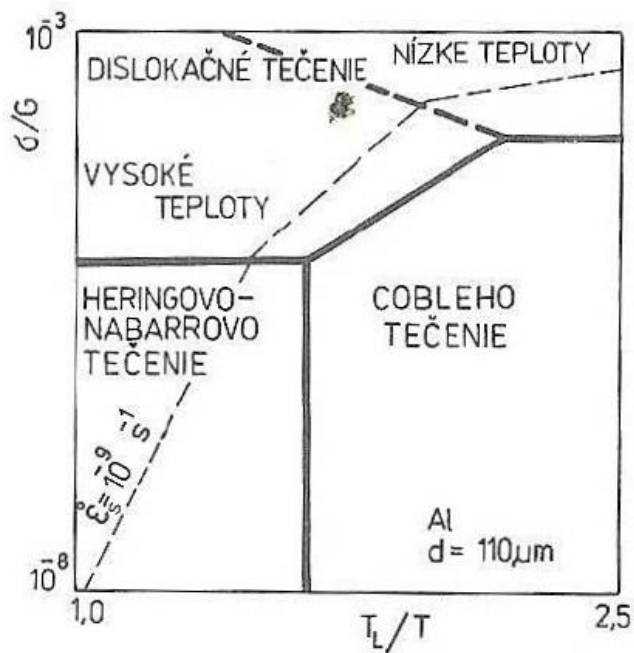


Jednotlivé oblasti představují dominantní deformační mechanismus pro dané kombinace napětí a deformace

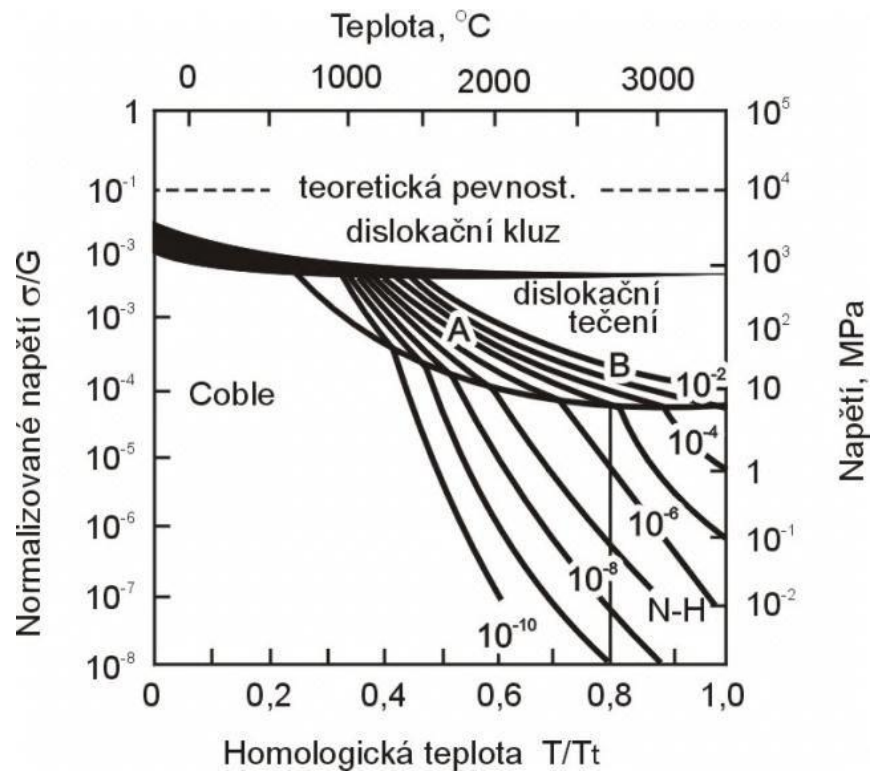
Deformace a lom při creepu



Deformace a lom při creepu



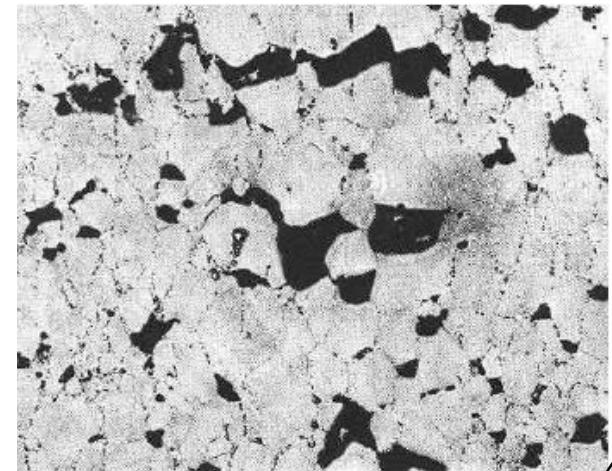
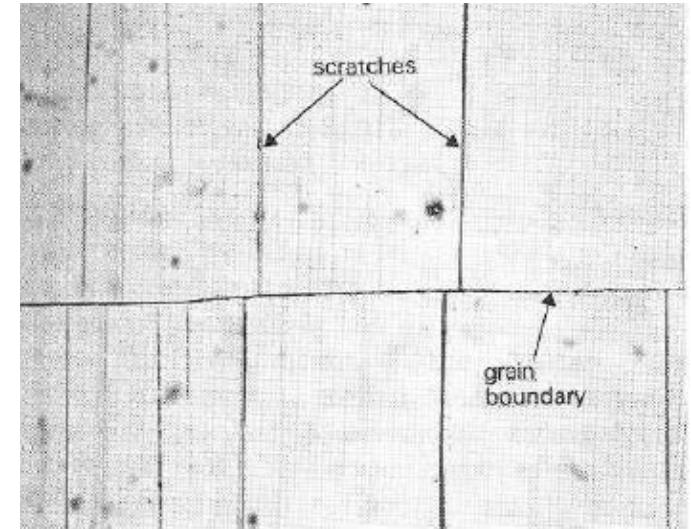
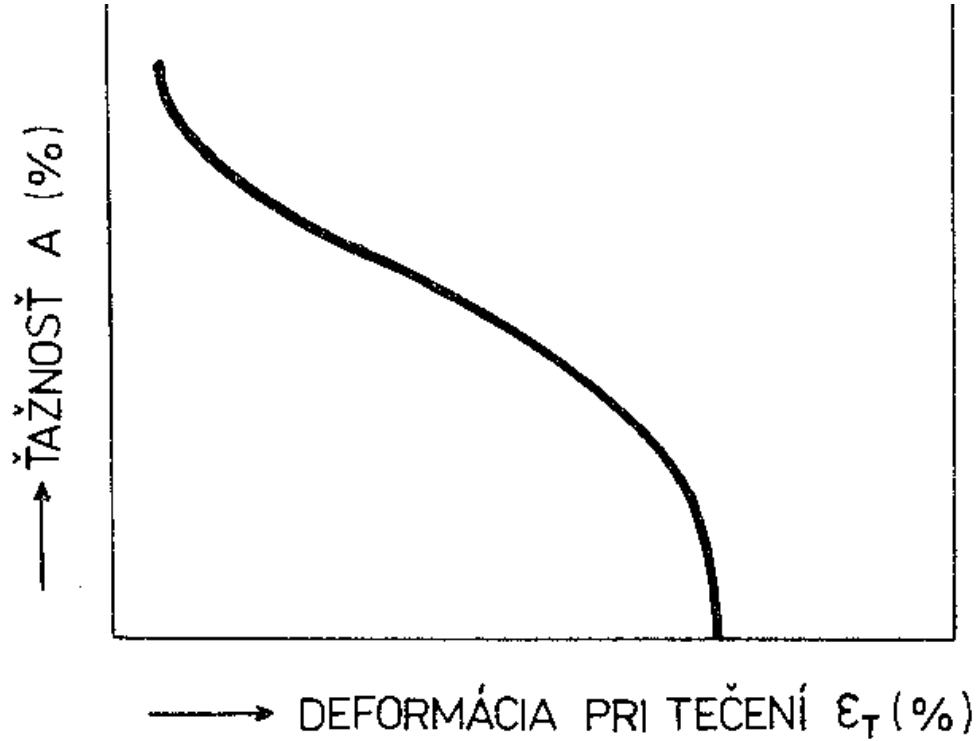
hliník



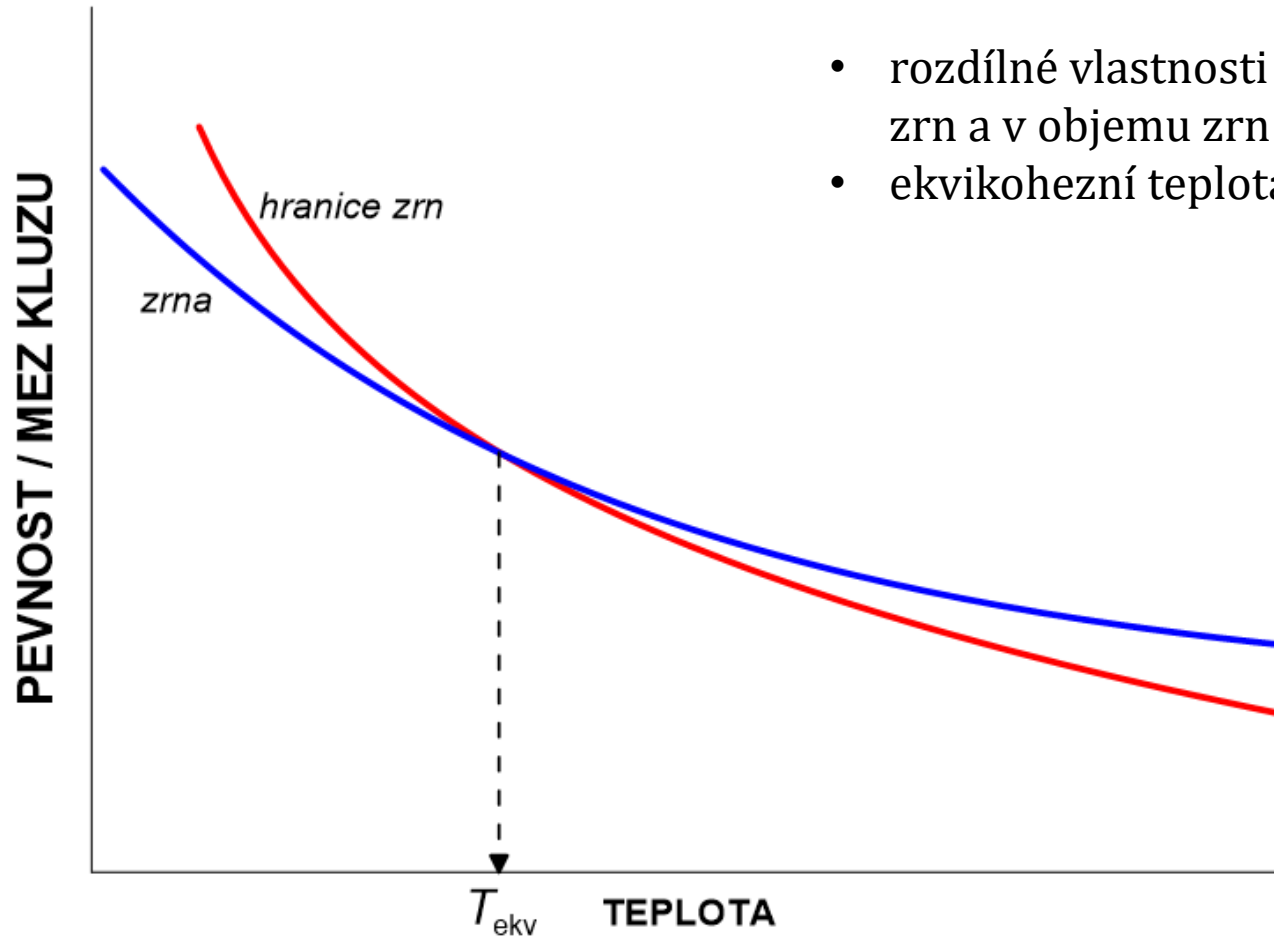
wolfram

Deformace a lom při creepu

Lom při creepu

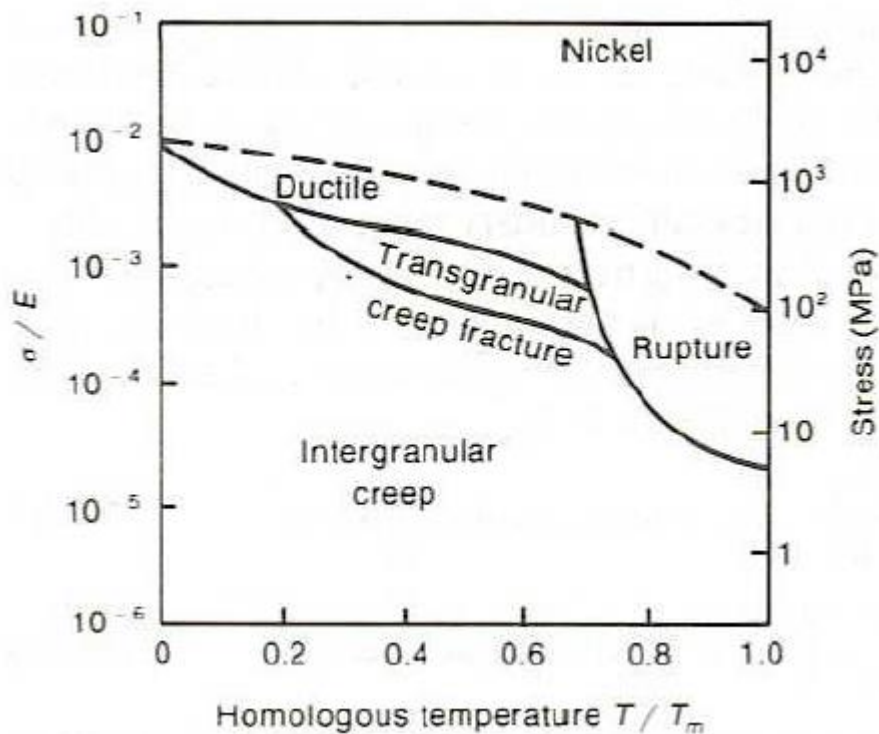


Deformace a lom při creepu



- rozdílné vlastnosti na hranicích zrn a v objemu zrn
- ekvikohezní teplota T_{ekv}

Deformace a lom při creepu – lom při creepu



Lomová mapa niklu

Teplota

Transkrystalické lomy

Skluzové roviny jsou slabší než hranice zrn

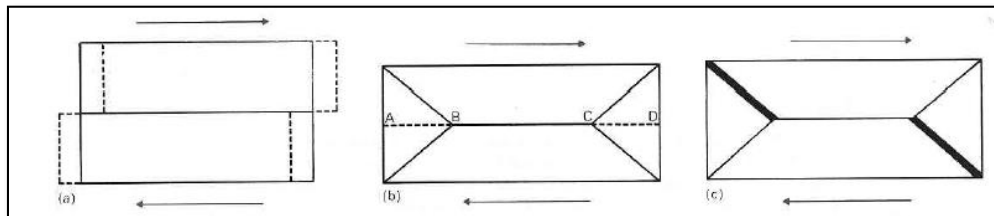
Interkrystalické lomy

Hranice zrn jsou slabší než skluzové roviny

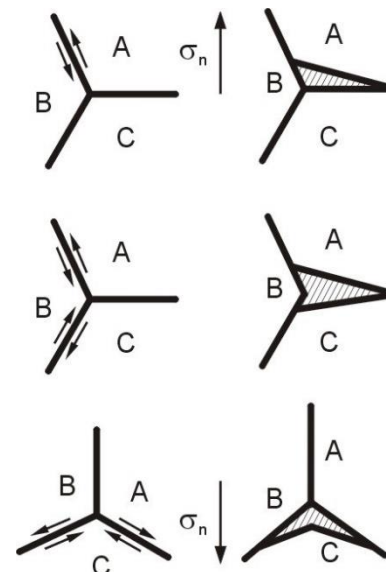
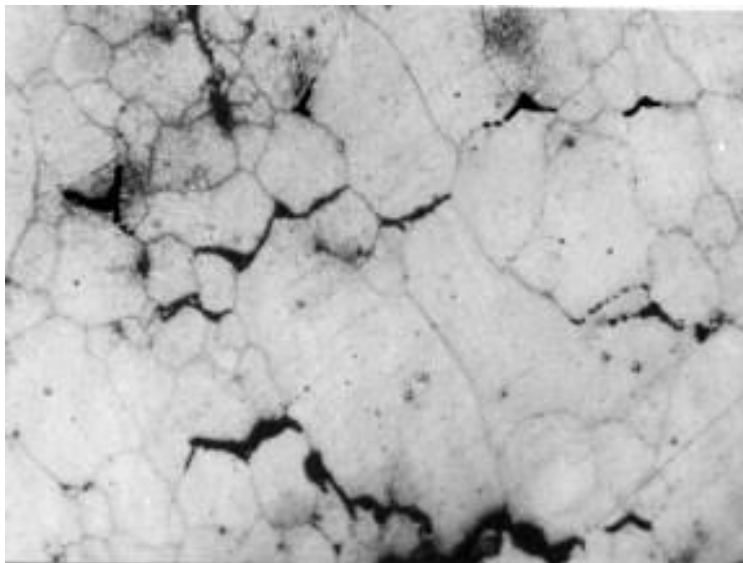
ekvikohezní teplota

Jednotlivé oblasti v mapě představují oblasti převládajících mechanismů lomu pro danou kombinaci napětí a teploty.

Deformace a lom při creepu – lom při creepu

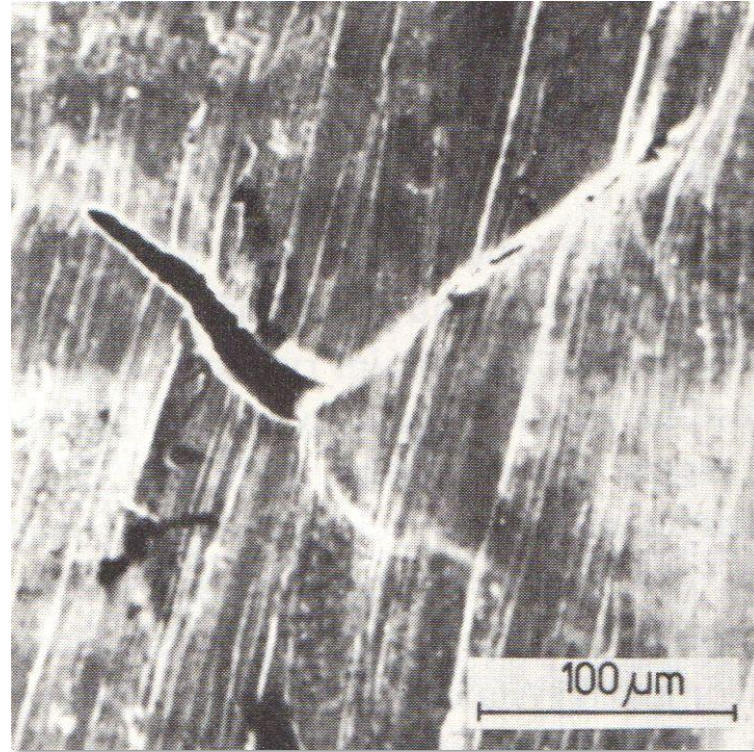


Klínové trhliny



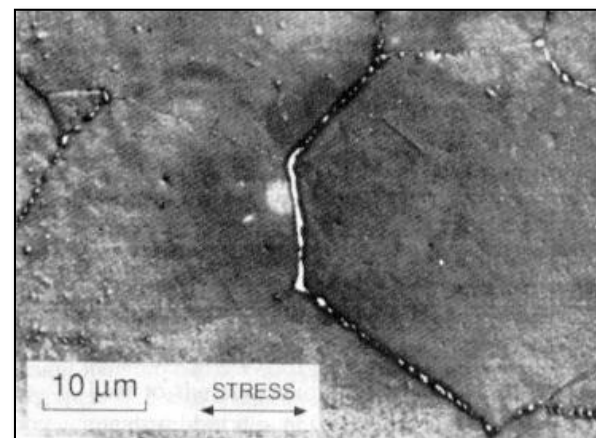
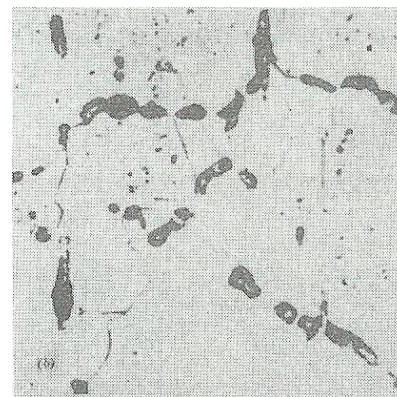
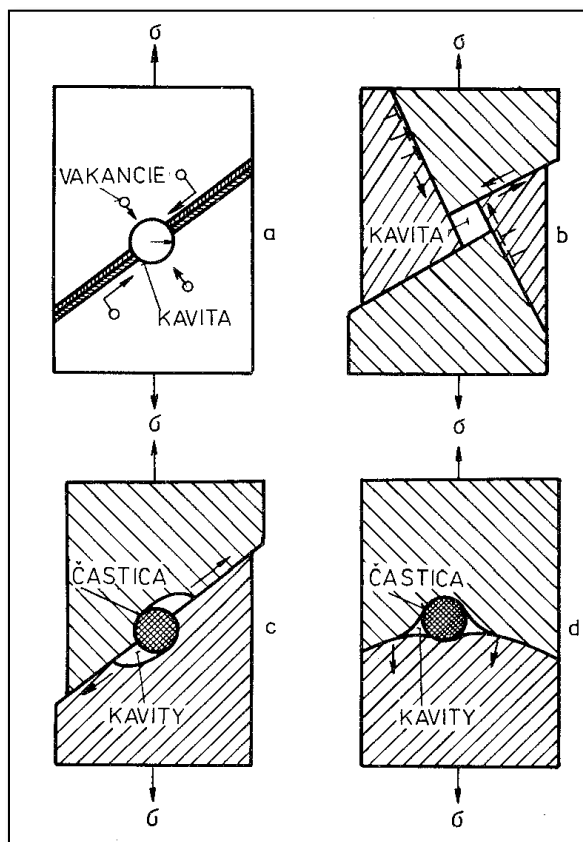
Deformace a lom při creepu – lom při creepu

Klínové trhliny



Klínová trhlina
creep oceli 18Cr – 10Ni (773 K, 300 MPa)

Deformace a lom při creepu – lom při creepu

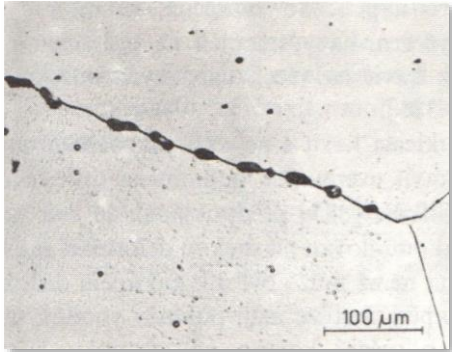


**Migrace vakancí, pokluzu po hranicích zrna,
částice cizích fází (skluz, migrace hranice)**

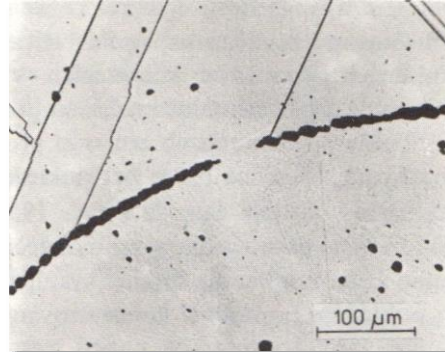


vznik kavit

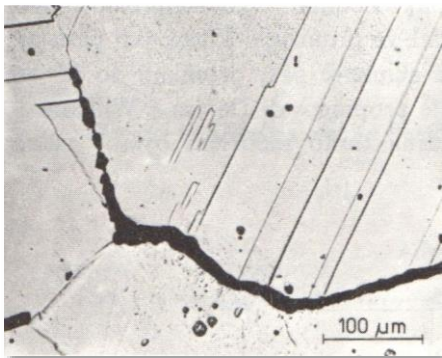
Deformace a lom při creepu – lom při creepu



a)



b)

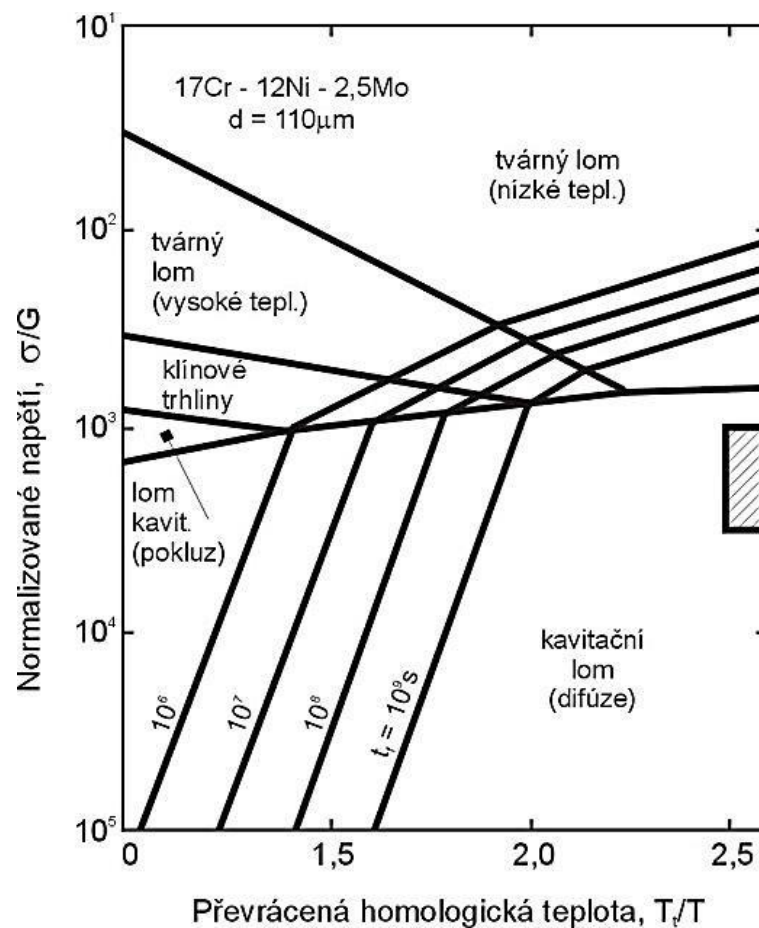
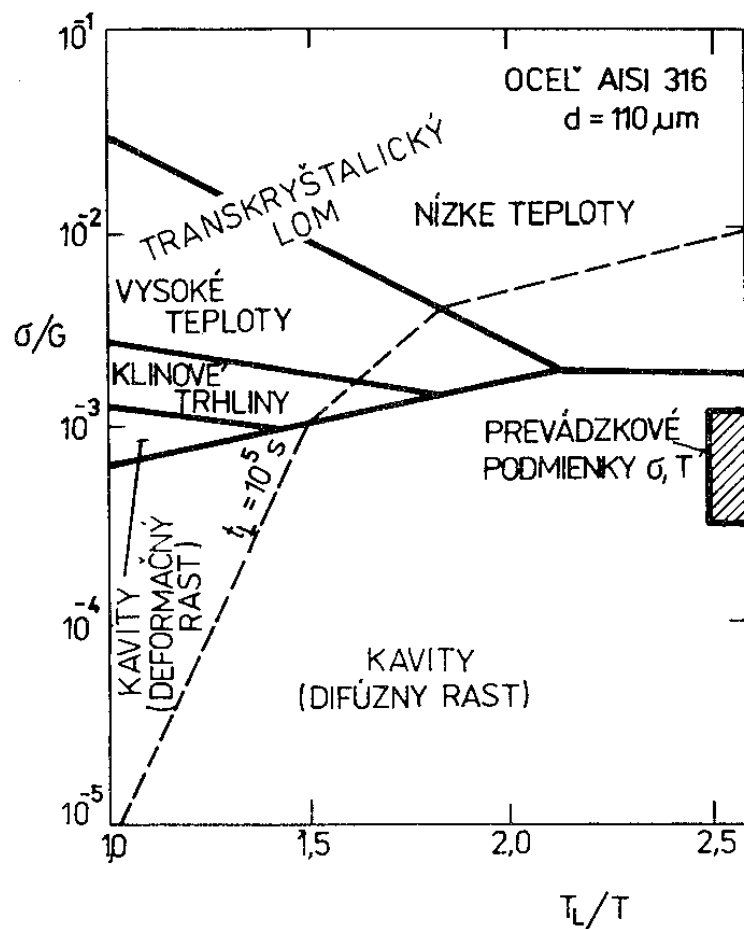


c)

Slitina Cu-30Zn (creep při 773 K, 10 MPa)

- a) Izolované kavity
- b) Koaleskované kavity
- c) Fazetové trhliny

Deformace a lom při creepu – lom při creepu



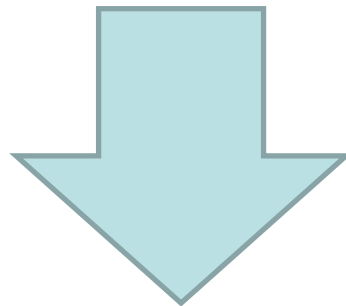
- Teplotní závislost pevnostních vlastností
- Vliv zvýšených teplot na vlastnosti ocelí
- Zkoušení creepového chování
- Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu
- Deformace a lom při creepu
- **Parametry ekvivalence teploty a času**

Parametry ekvivalence teploty a času

životnost zařízení, komponent apod. je obvykle projektována na 10 a více let

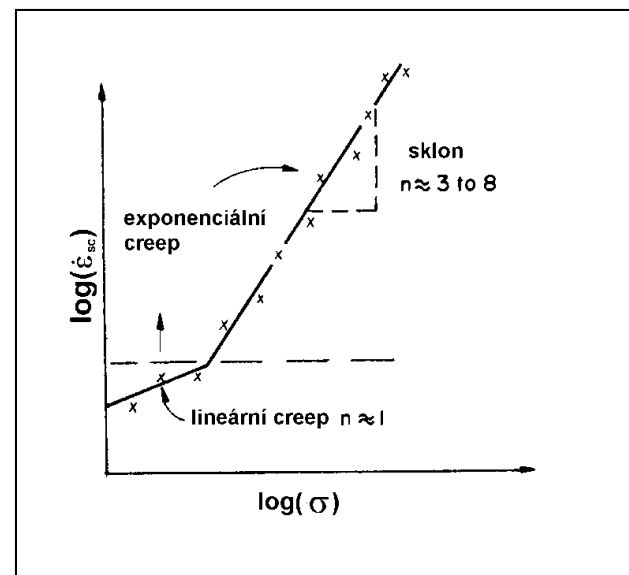
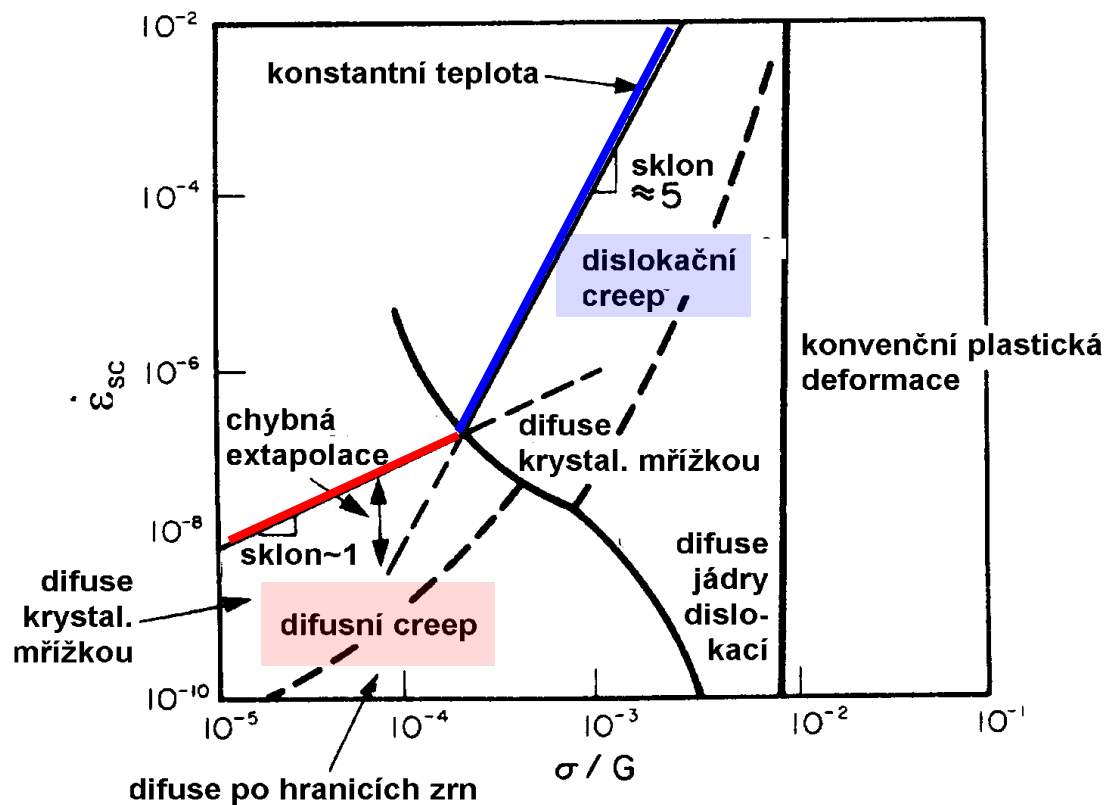
versus

akceptovatelná doba laboratorních zkoušek



extrapolace laboratorních výsledků na reálné konstrukce

Parametry ekvivalence teploty a času

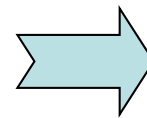


Parametry ekvivalence teploty a času

- parametr **Sherby-Dorn**
- parametr **Larson-Miller**
- parametr **Manson-Haferd**

$$\dot{\varepsilon}_{SC} = A\sigma e^{-\frac{Q}{RT}} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{SC} &= \frac{d\varepsilon_{SC}}{dt} = A\sigma e^{-\frac{Q}{RT}} \\ d\varepsilon_{SC} &= A\sigma e^{-\frac{Q}{RT}} dt \end{aligned}$$

po integraci

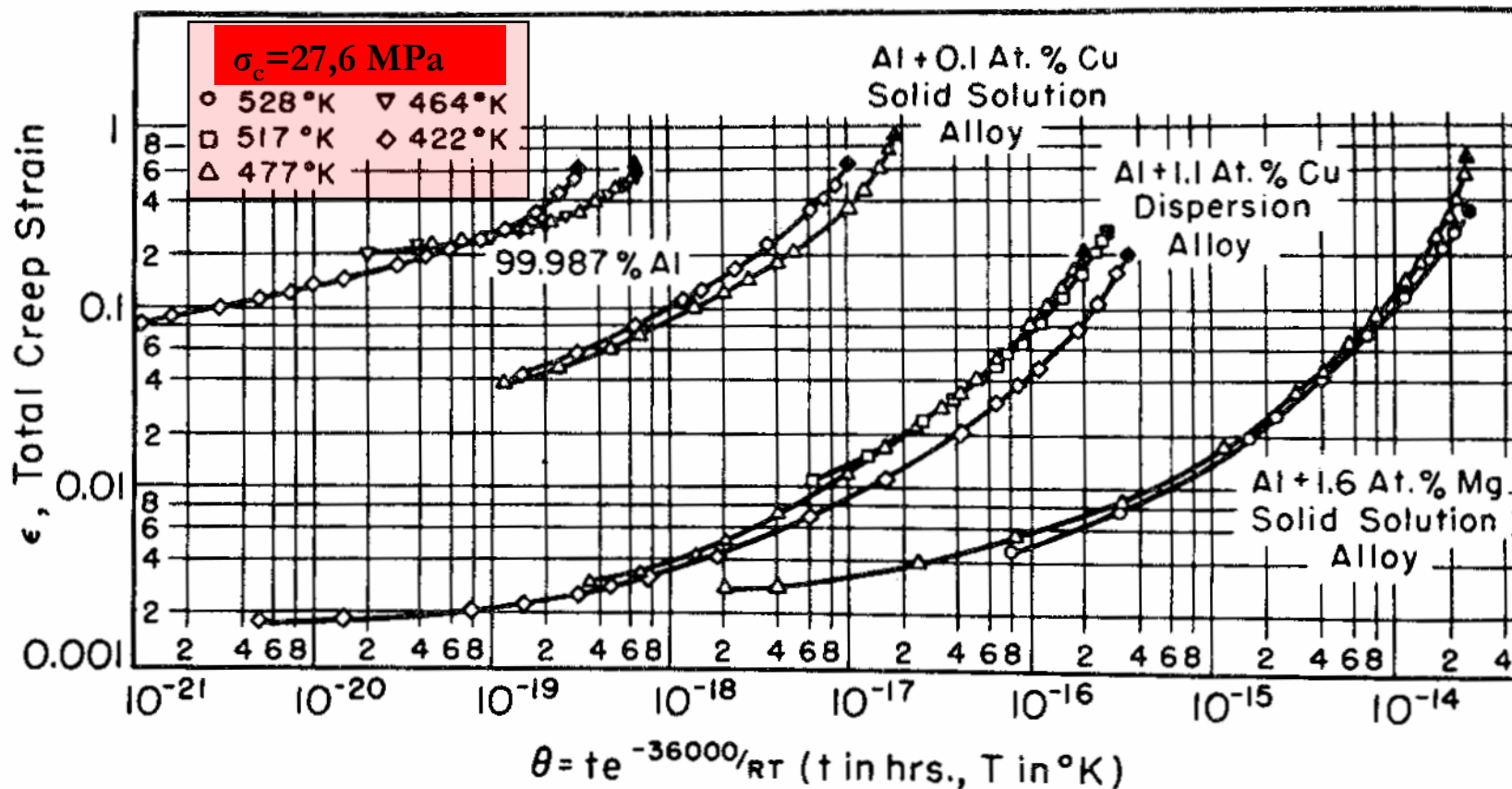


temperature-compensated time



$$\begin{aligned} \varepsilon_{SC} &= A\sigma t e^{-\frac{Q}{RT}} \\ \theta &= \frac{\varepsilon_{SC}}{A\sigma} = t \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \end{aligned}$$

Parametry ekvivalence teploty a času



Parametry ekvivalence teploty a času

Sherby-Dorn parameter

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

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

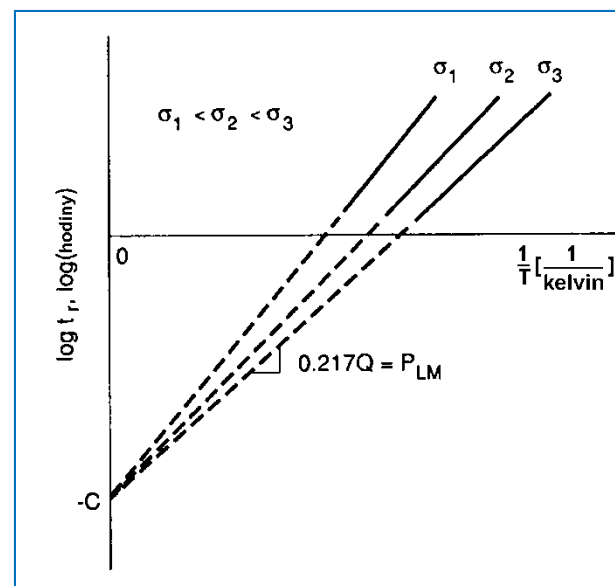
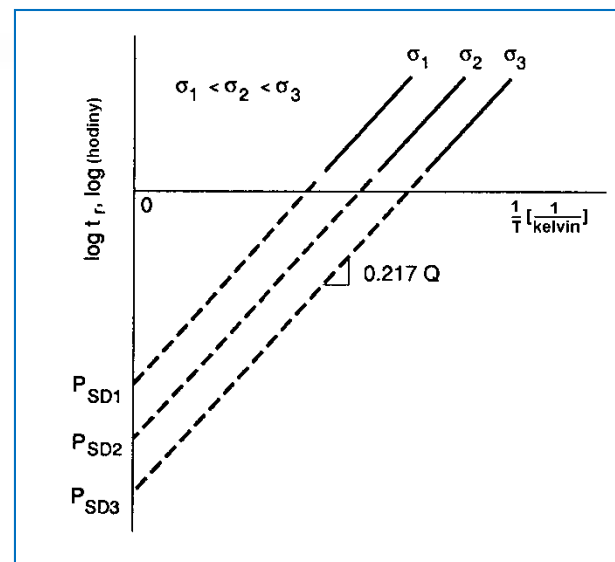
Larson-Miller parameter

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

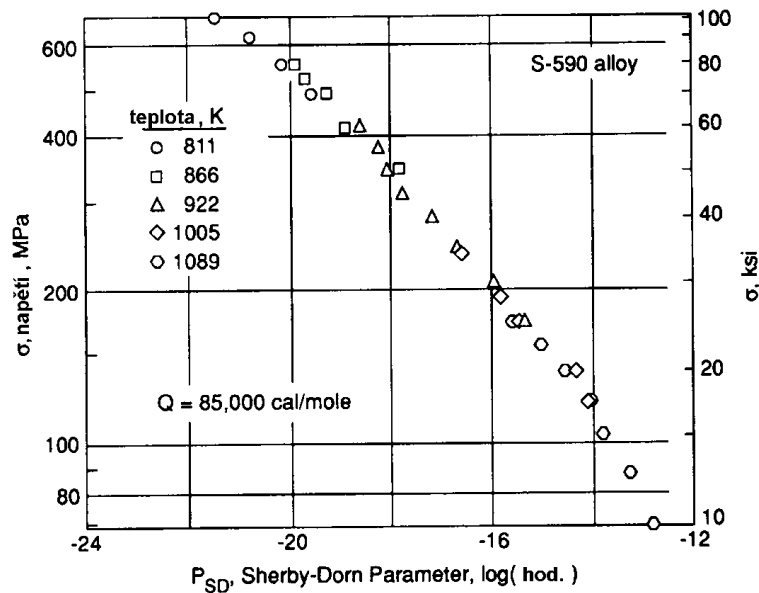
$$\text{substitute : } \log \theta = -C$$

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

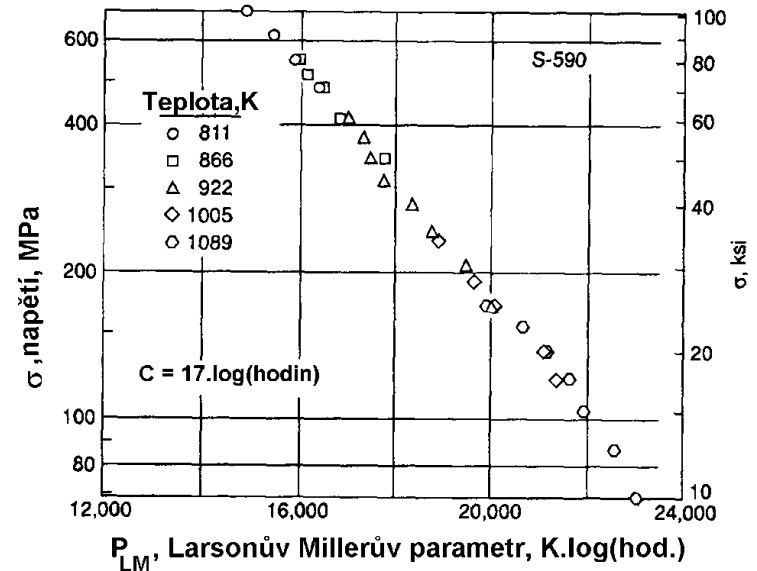
$$P_{LM} = 0,217Q = T[\log t + C]$$



Parametry ekvivalence teploty a času



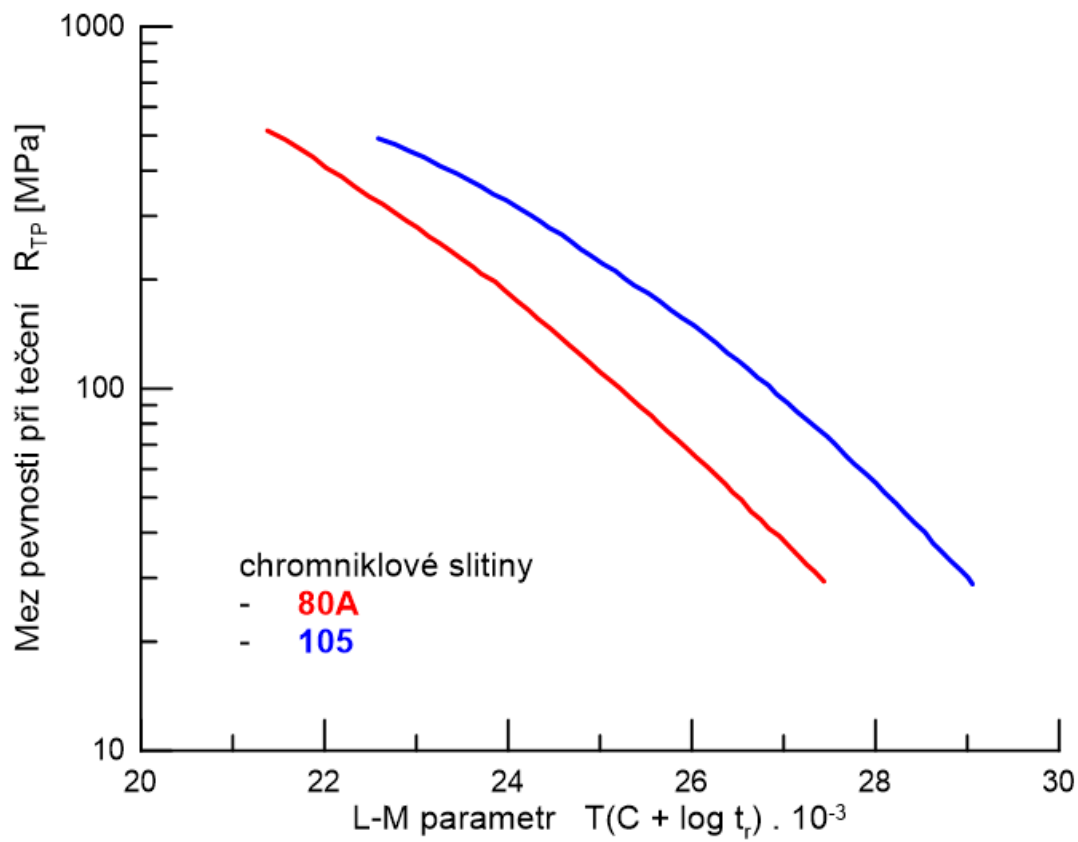
$$P_{SD} = \log t - 0,217 \frac{Q}{T}$$



$$P_{LM} = T [\log t + C]$$

Je nutná znalost alespoň jedné dvojice bodů.

Parametry ekvivalence teploty a času

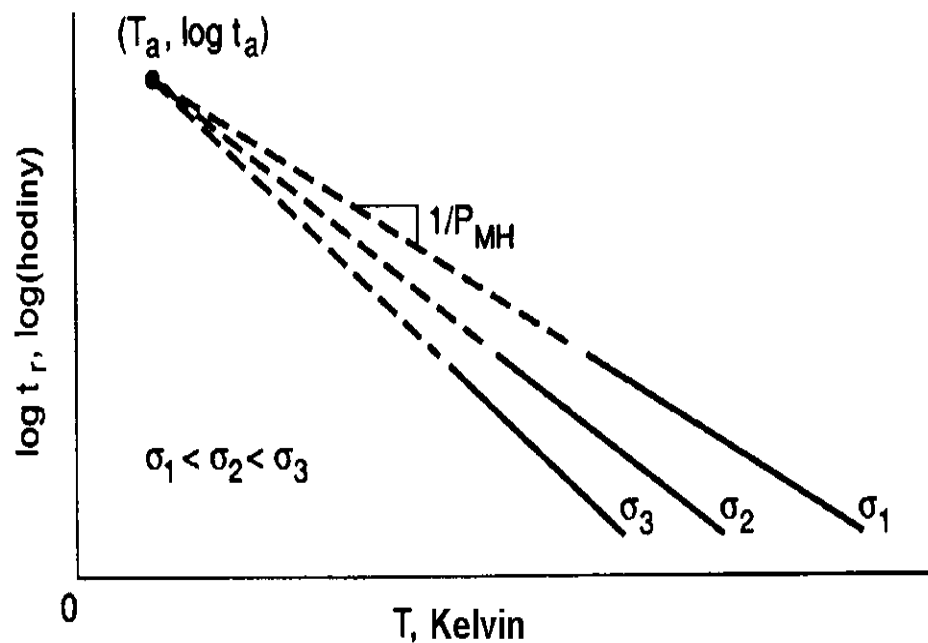


Parametry ekvivalence teploty a času

Manson-Haferd

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

Material	Sherby-Dorn Q , cal/mole	Larson-Miller C	Manson-Haferd	
			T_a , K	$\log t_a$
Various steels and stainless steels	$\approx 90,000$	≈ 20	—	—
Pure aluminum and dilute alloys	$\approx 36,000$	—	—	—
S-590 alloy (Fe base)	85,000 ⁵	17	172	20
A-286 stainless steel	91,000	20	367	16
Nimonic 80A (Ni base)	91,000	18	311	16
1Cr-1Mo-0.25V steel	110,000	22	311	18



Je nutná znalost alespoň jedné dvojice bodů.