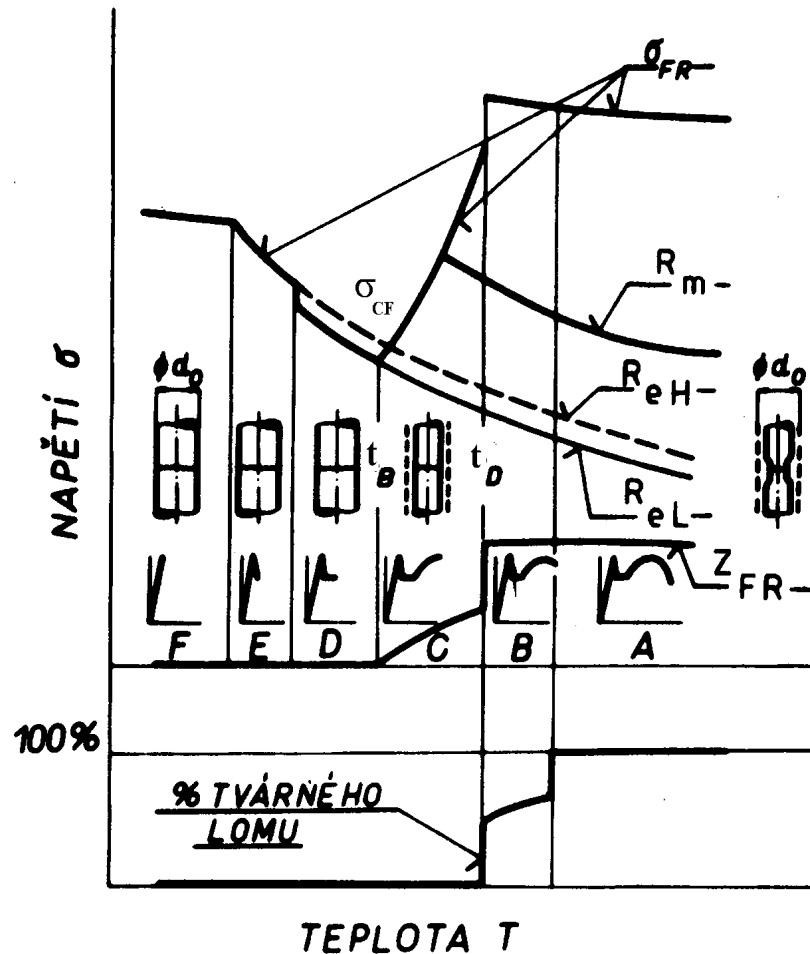


CREEP

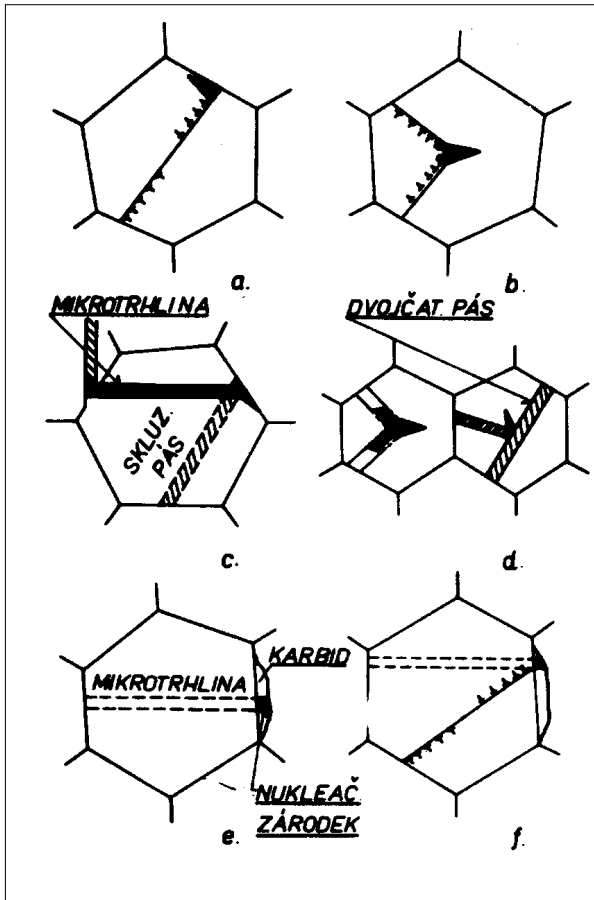
Mezní stavy materiálů (6MS)



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

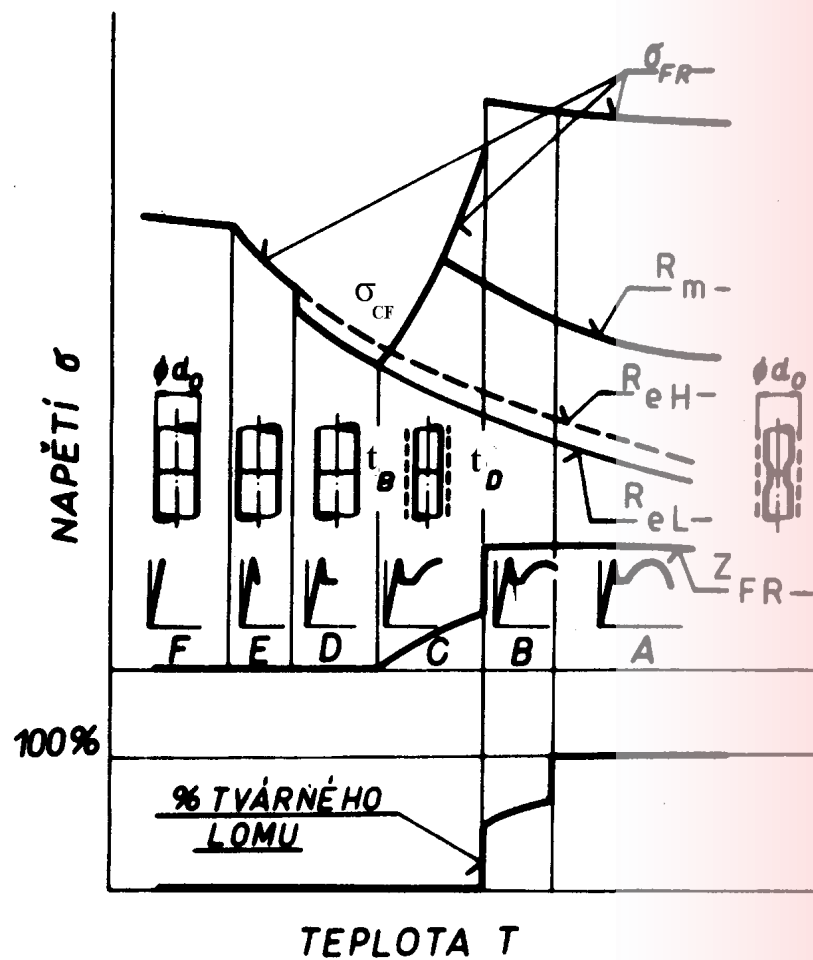


První podmínkou

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

Druhou podmínkou

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



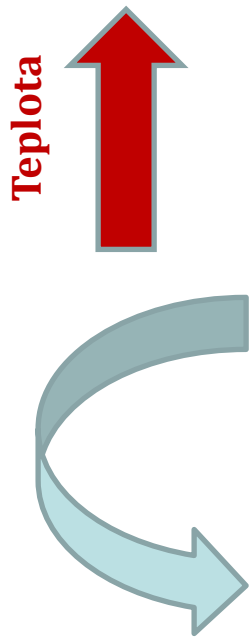
CREEP

TEPLOTA



- 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

Vliv zvýšených teplot na vlastnosti (kovových) materiálů

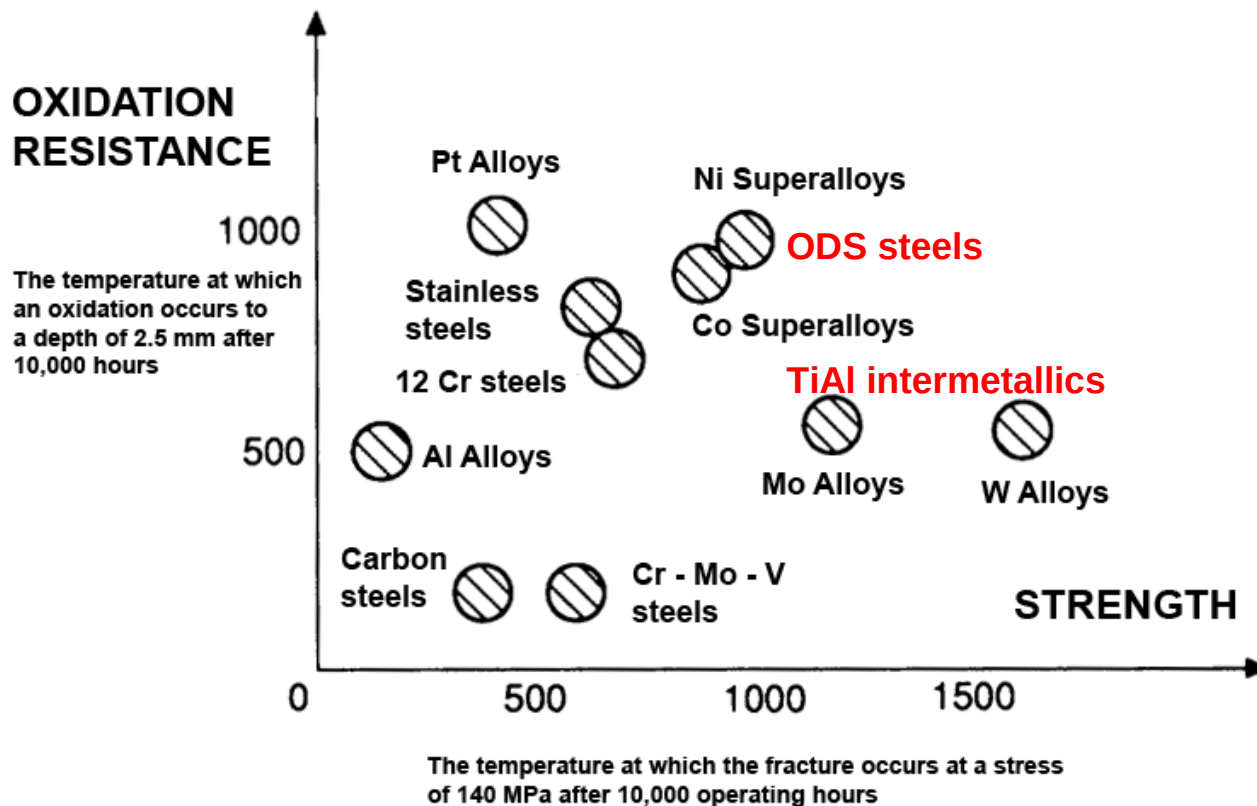


- růst vlivu difúzních procesů
- větší mobilita dislokací (šplh)
- nárůst množství vakancí v mřížce
- deformace hranic zrn
- metalurgické změny (fázové transformace, precipitace, oxidace, rekrystalizace, ...)

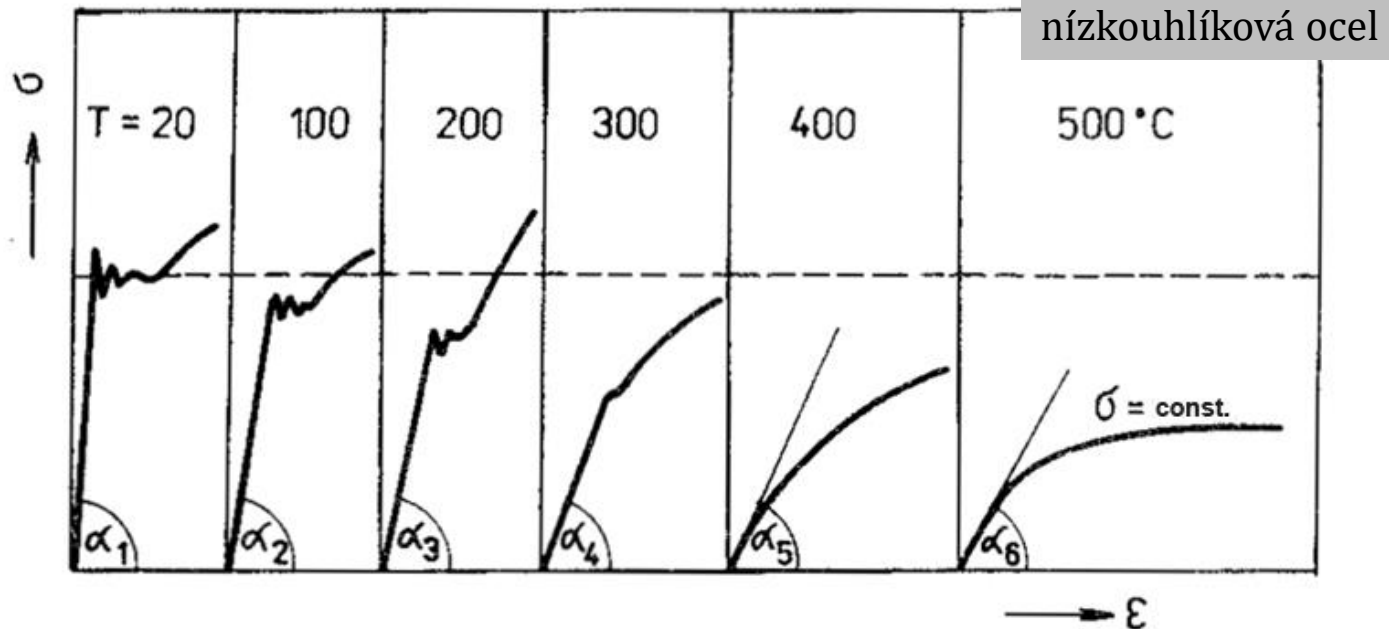
Vysokoteplotní materiály (slitiny)

- Odpovídající pevnostní charakteristiky.
- Dostatečná odolnost proti oxidaci.

Vliv zvýšených teplot na vlastnosti (kovových) materiálů



Vliv zvýšených teplot na vlastnosti (kovových) materiálů



Teplota < 350 °C

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

Teplota > 350 °C

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

Co je creep?

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

Deformace

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

Creep

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

Co je creep?

Při jakých teplotách dochází ke creepu?

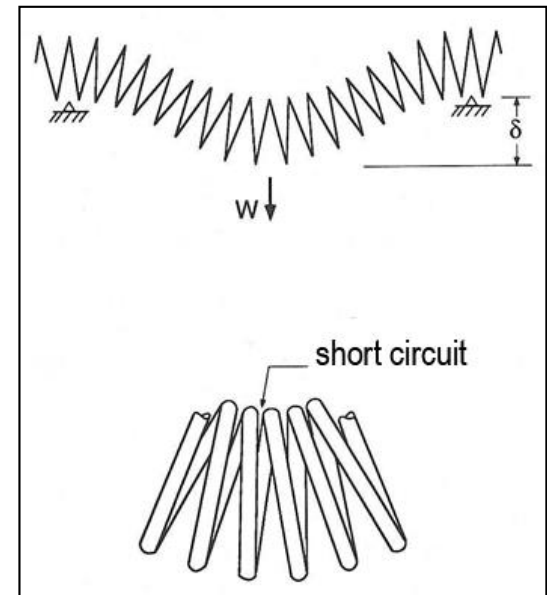
Creep je významný za **homologických teplot** $> 0.3 \div 0.5$ (výjimkou jsou Ni superslitiny ≈ 0.75)

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

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:	$\approx 2000^\circ\text{C}$



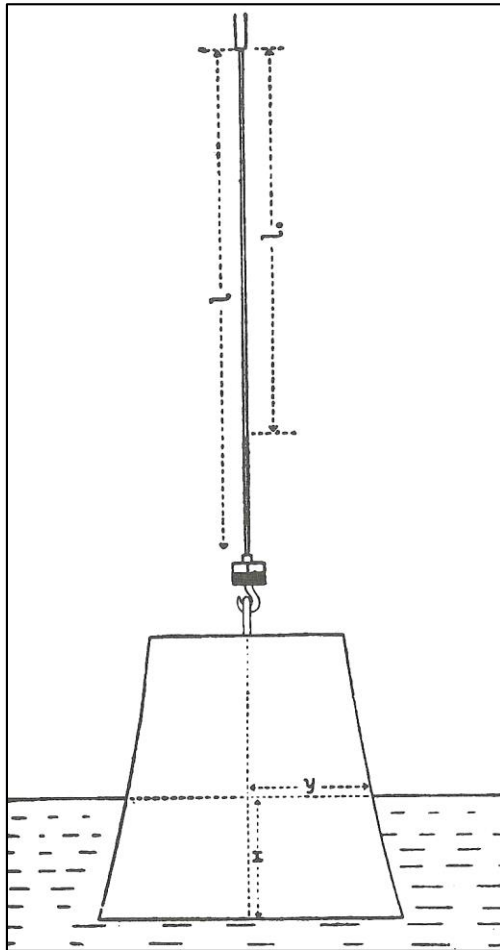
Co je creep?

TABLE 17.1
MELTING OR SOFTENING^(S) TEMPERATURE

Material	/K	Material	/K
Diamond, graphite	4000	Silica glass	1100
Tungsten	3680	Aluminium	933
Tantalum	3250	Magnesium	923
Silicon carbide, SiC	3110	Soda glass	700–900
Magnesia, MgO	3073	Zinc	692
Molybdenum	2880	Polyimides	580–630 ^(S)
Niobium	2740	Lead	600
Beryllia, BeO	2700	Tin	505
Alumina, Al ₂ O ₃	2323	Melamines	400–480 ^(S)
Silicon nitride, Si ₃ N ₄	2173	Polyesters	450–480 ^(S)
Chromium	2148	Polycarbonates	400 ^(S)
Zirconium	2125	Polyethylene, high-density	300 ^(S)
Platinum	2042	Polyethylene, low-density	360 ^(S)
Titanium	1943	Foamed plastics, rigid	300–380 ^(S)
Iron	1809	Epoxy, general purpose	340–380 ^(S)
Cobalt	1768	Polystyrenes	370–380 ^(S)
Nickel	1726	Nylons	340–380 ^(S)
Cermets	1700	Polyurethane	365 ^(S)
Silicon	1683	Acrylic	350 ^(S)
Alkali halides	800–1600	GFRP	340 ^(S)
Uranium	1405	CFRP	340 ^(S)
Copper	1356	Polypropylene	330 ^(S)
Gold	1336	Ice	273
Silver	1234	Mercury	235

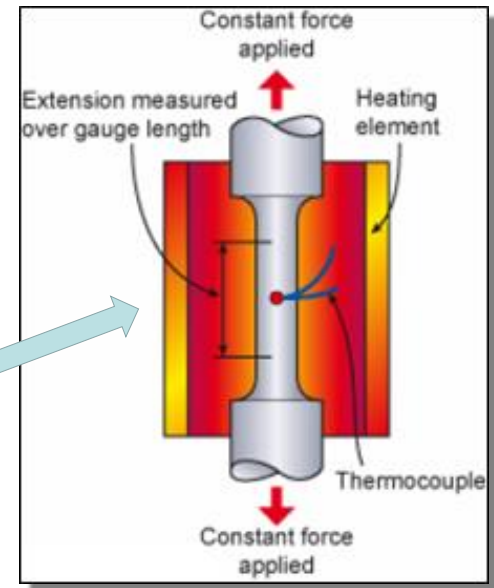
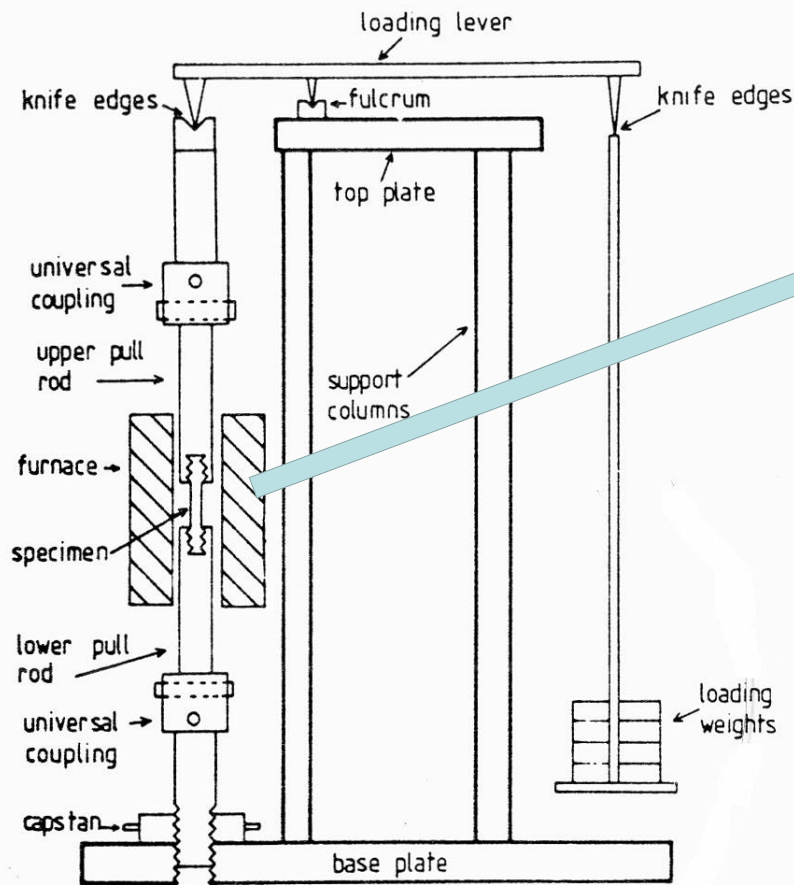
- Teplotní závislost pevnostních vlastností
- Vliv zvýšených teplot na vlastnosti ocelí
- **Zkoušení creepového chování**
- Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu
- Deformace a lom při creepu
- Parametry ekvivalence teploty a času

Zkoušky creepového chování



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

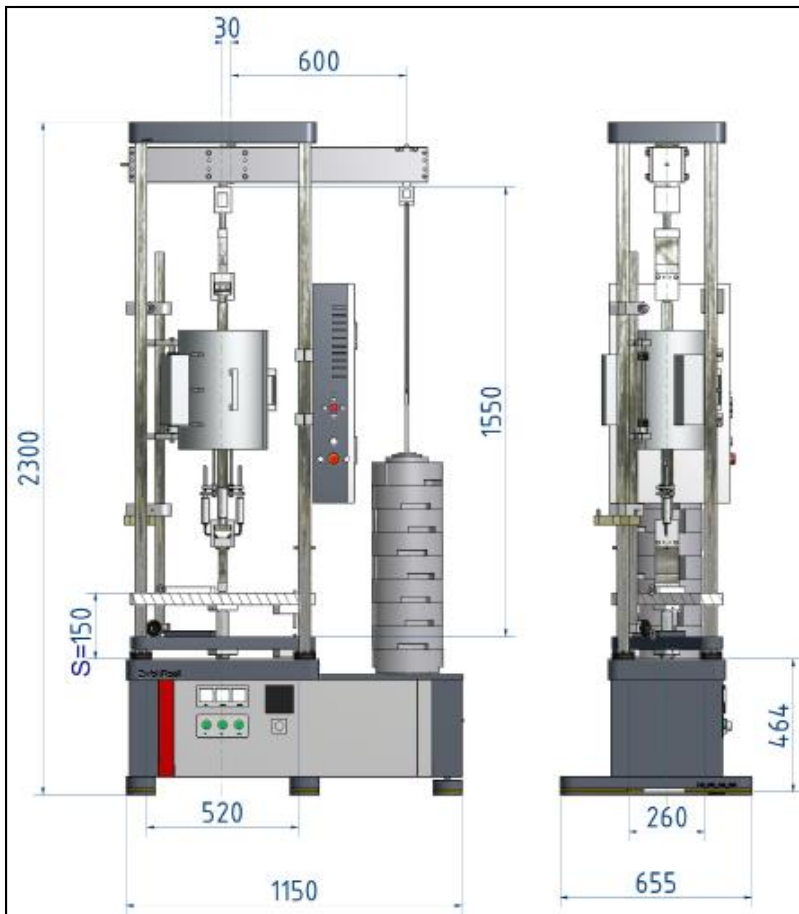
Zkoušky creepového chování



Zajímá nás (měří se):

- deformace v závislosti na čase
- doba do lomu

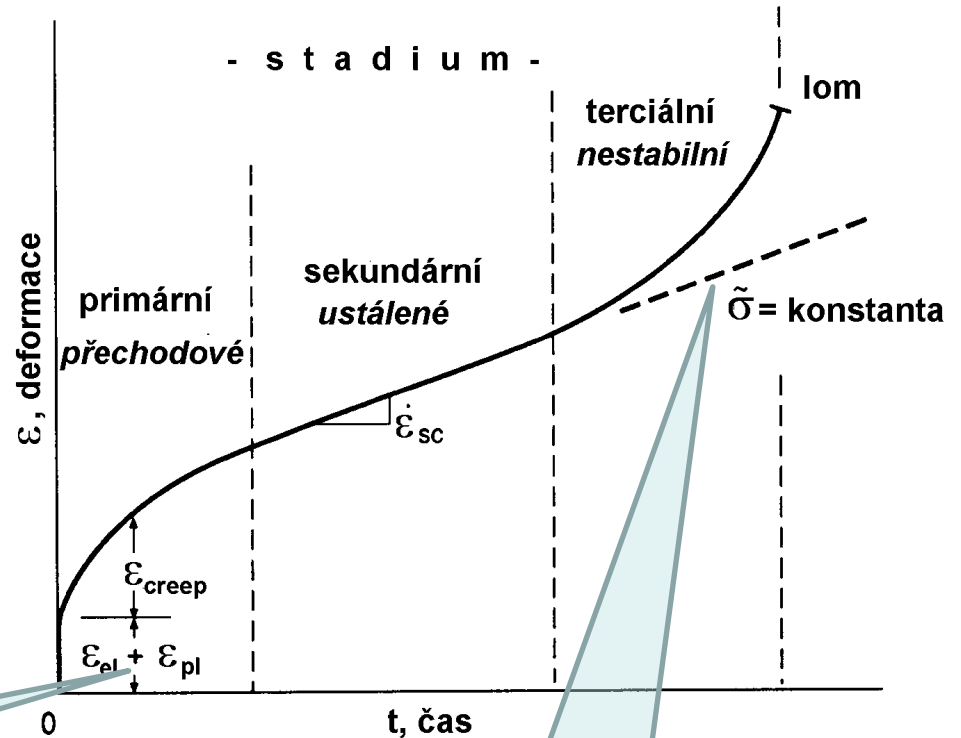
Zkoušky creepového chování



Zkoušky creepového chování

Zajímá nás (měří se):

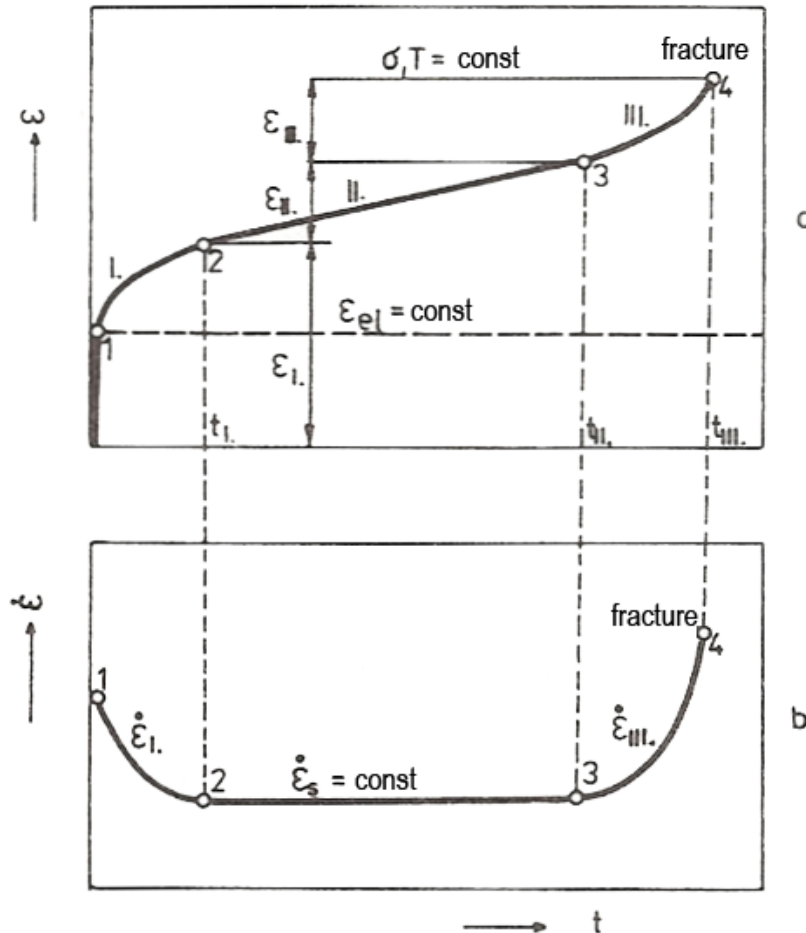
- deformace v závislosti na čase
- doba do lomu



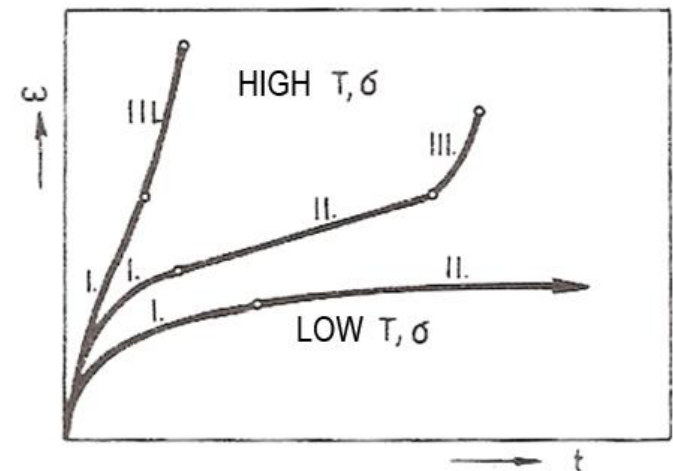
Částečně vratná (anelastická) a nevratná (plastická) okamžitá deformace vzniklá v okamžiku aplikování zatížení

Křivka při měření závislosti deformace – čas v režimu konstantního napětí

Zkoušky creepového chování

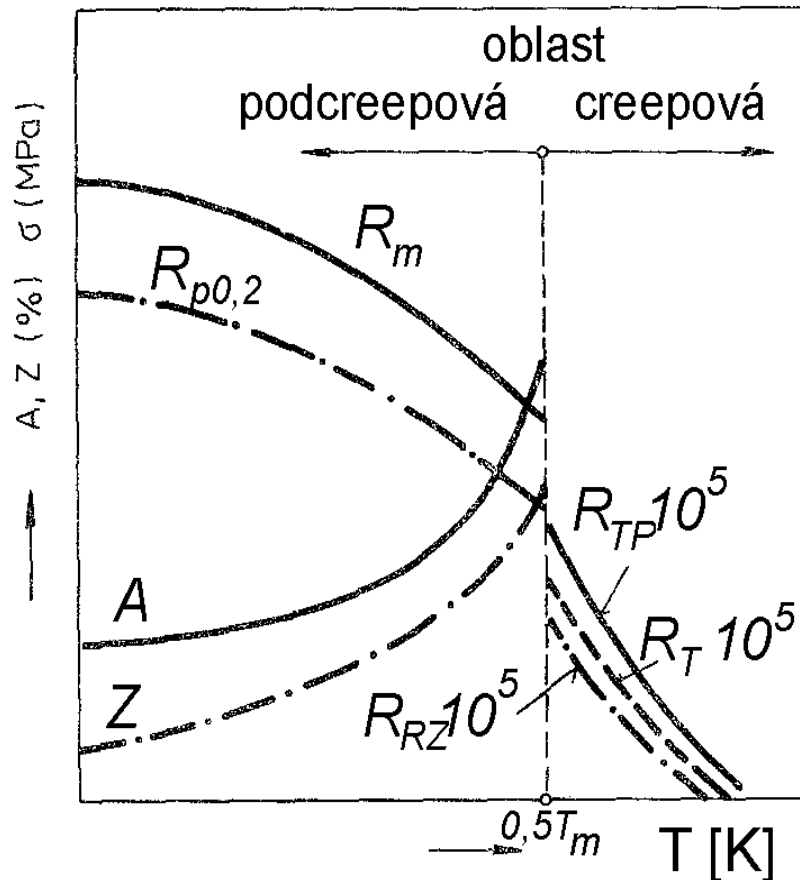


- I. **Primární creep** – rychlost creepu klesá
- II. **Sekundární creep** – rychlost creepu je konstantní (*steady state*)
- III. **Terciární creep** – rychlost creepu roste; stádium zakončené lomem



- 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

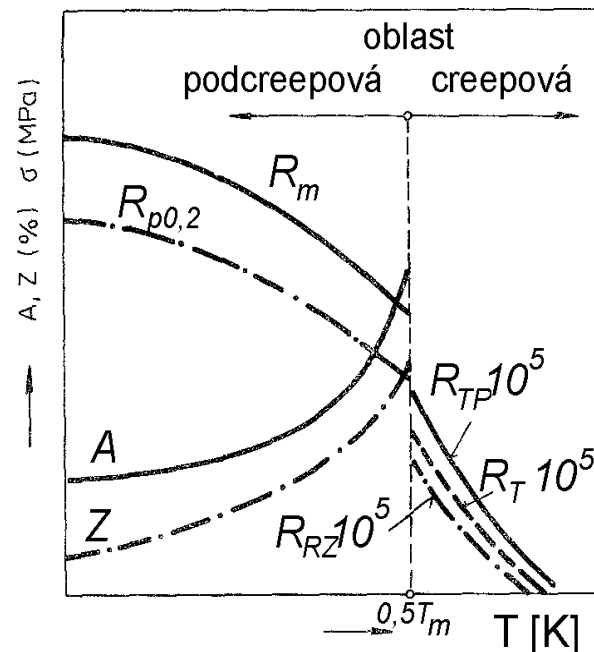
Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu

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

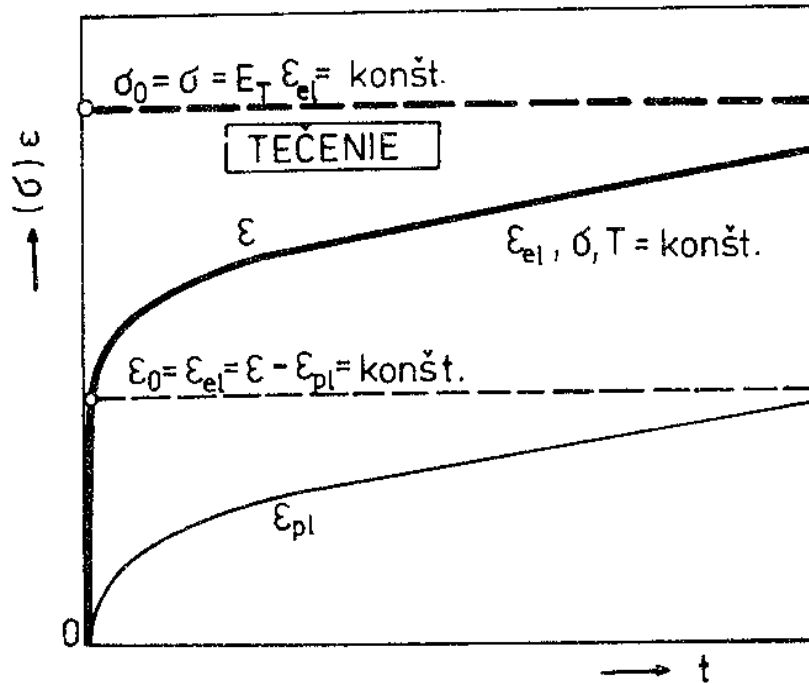
Příklad: ocel P265H (11 418); $R_e=265$ MPa, $R_m=450$ MPa
 $R_{TP}=165/380/10^5 \sim \langle \text{MPa} / ^\circ\text{C}/\text{hod.} \rangle$

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

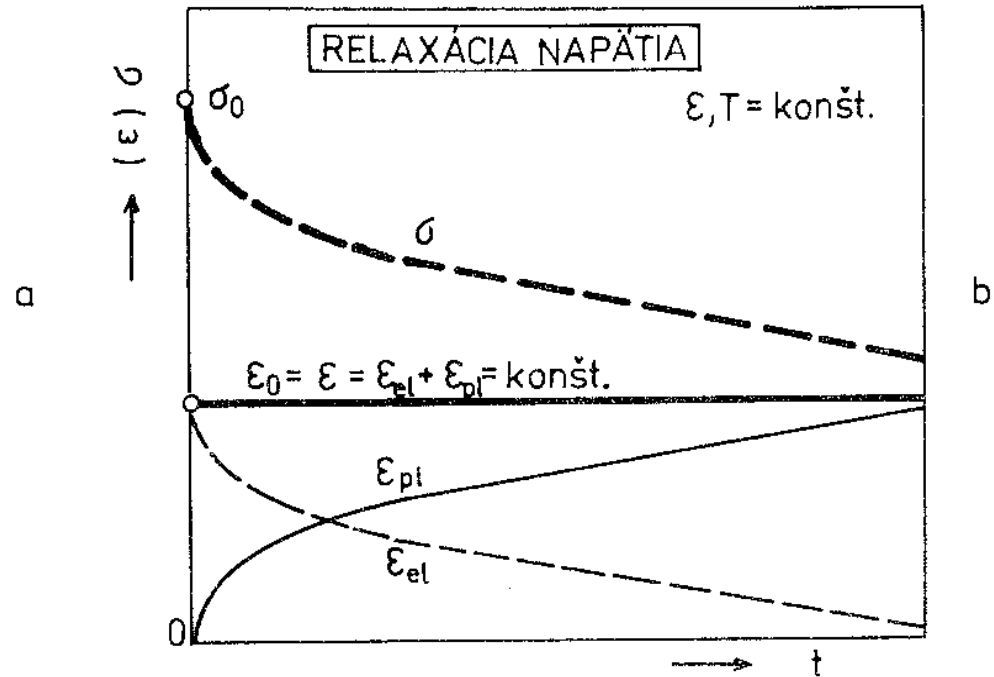
Příklad: ocel P265H (11 418); $R_e=265$ MPa, $R_m=450$ MPa
 $R_{TP}=132/380/1/10^5 \sim \langle \text{MPa} / ^\circ\text{C}/\%/ \text{hod.} \rangle$



Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu



Měkké zatížení (potrubí, ...)



Tvrdé zatížení (šrouby, ...)

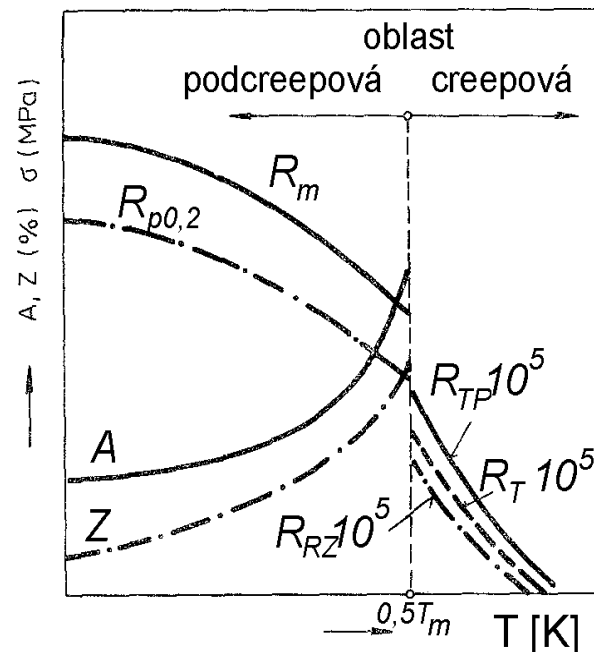
Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu

Relaxace

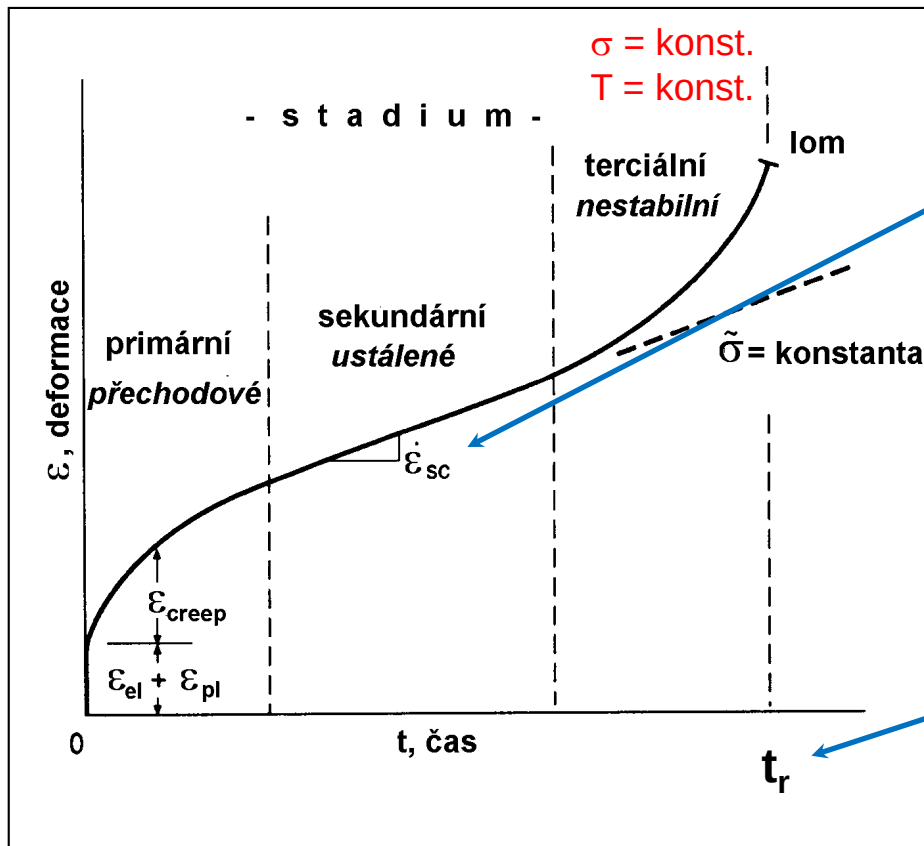
výchozí napětí R_R [MPa]
teplota

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

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



Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu

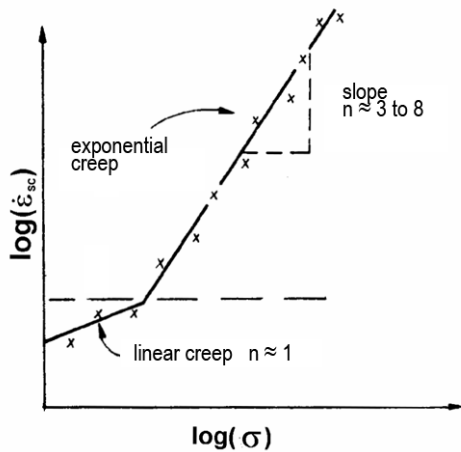


Rychlost ustáleného creepu
směrnice závislosti ε vs. t
v sekundárním stádiu creepu
(*steady-state rate*)

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

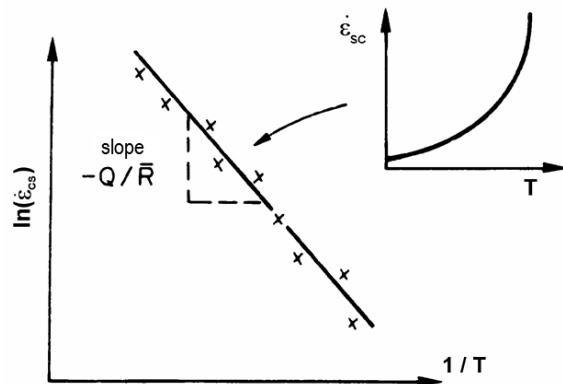
Čas do lomu
pro dané podmínky zatěžování

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

(**n = 1** dif. creep; **n > 1** disl. creep)

R – univ. plyn. konstanta: $8,31 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$

T – teplota v [K]

Q – aktivační energie [J.mol^{-1}]

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

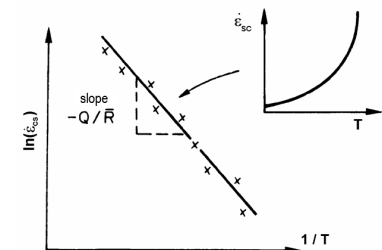
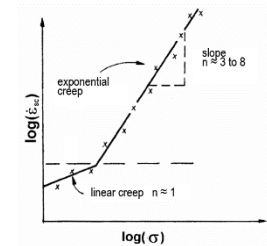
Kovové materiály

DIFÚZNÍ CREEP

Tok vakancí a intersticiálů
krystalovou mřížkou pod vlivem
aplikovaného napětí

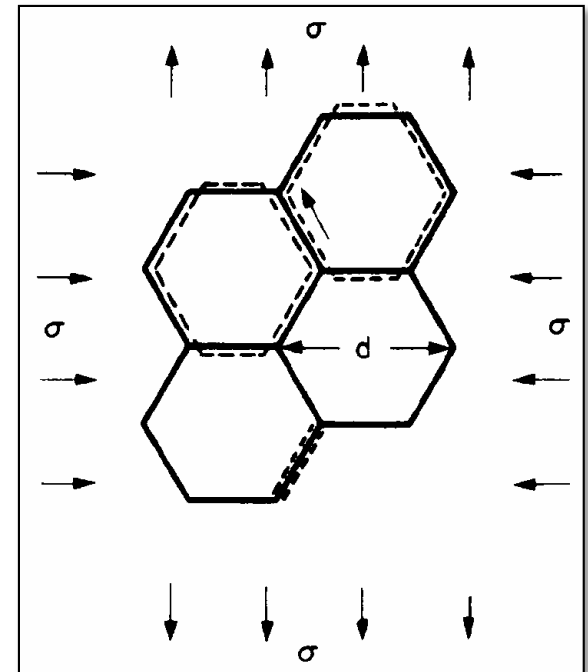
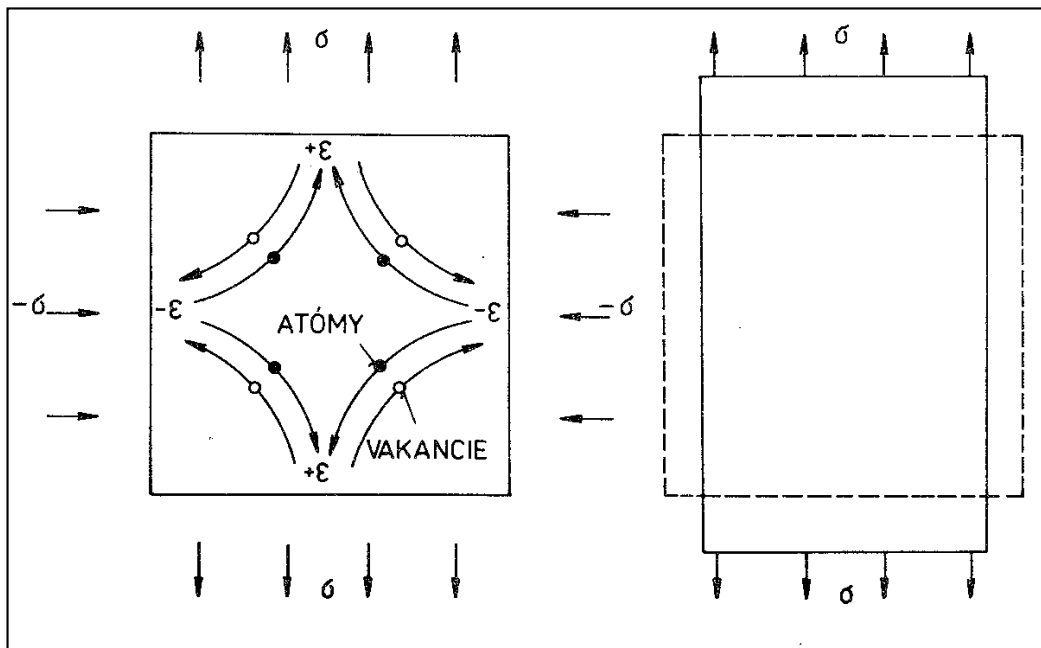
DISLOKAČNÍ CREEP

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

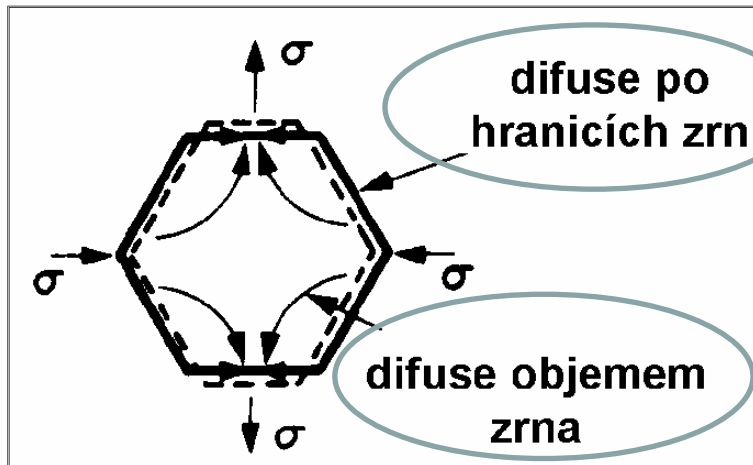
$$\dot{\epsilon}_{SC} = \frac{\sigma A_2}{d^3} D_B$$

nižší napětí,
nižší teplota

Herring-Nabarro creep

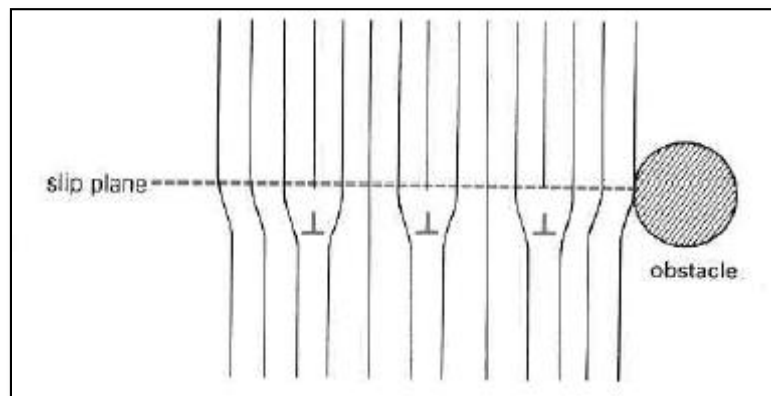
$$\dot{\epsilon}_{SC} = \frac{\sigma A_1}{d^2} D_G$$

nižší napětí,
vysoká teplota

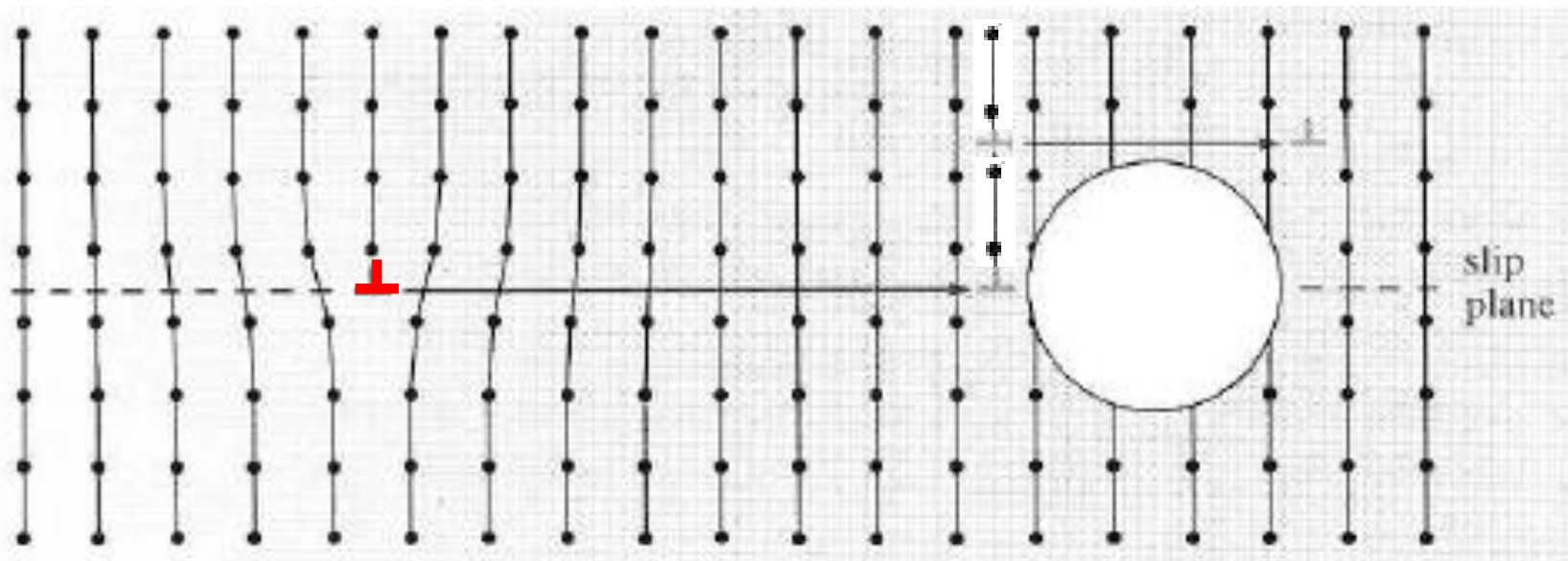


Deformace a lom při creepu

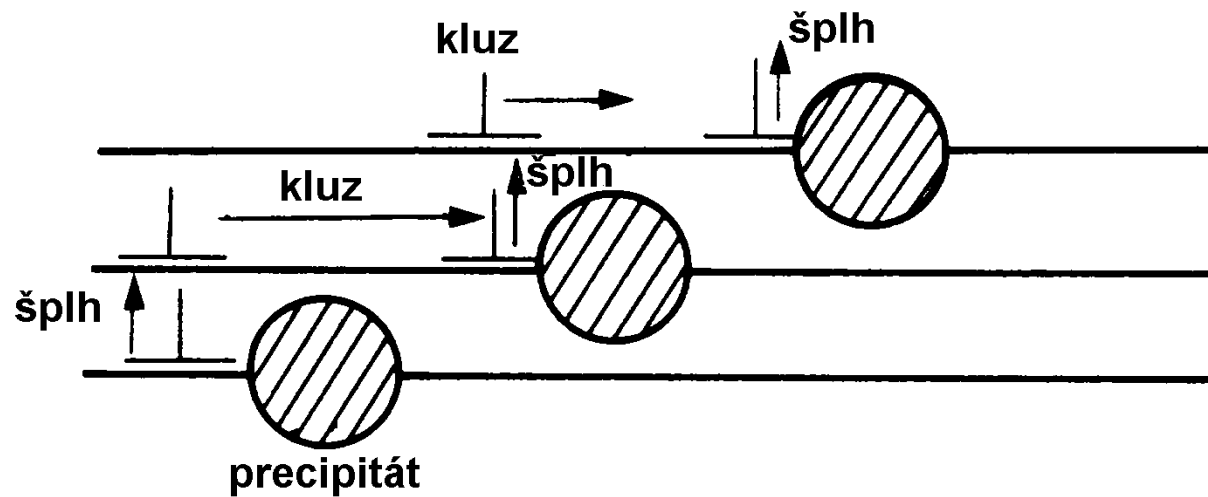
DISLOKAČNÍ CREEP



šplh dislokací



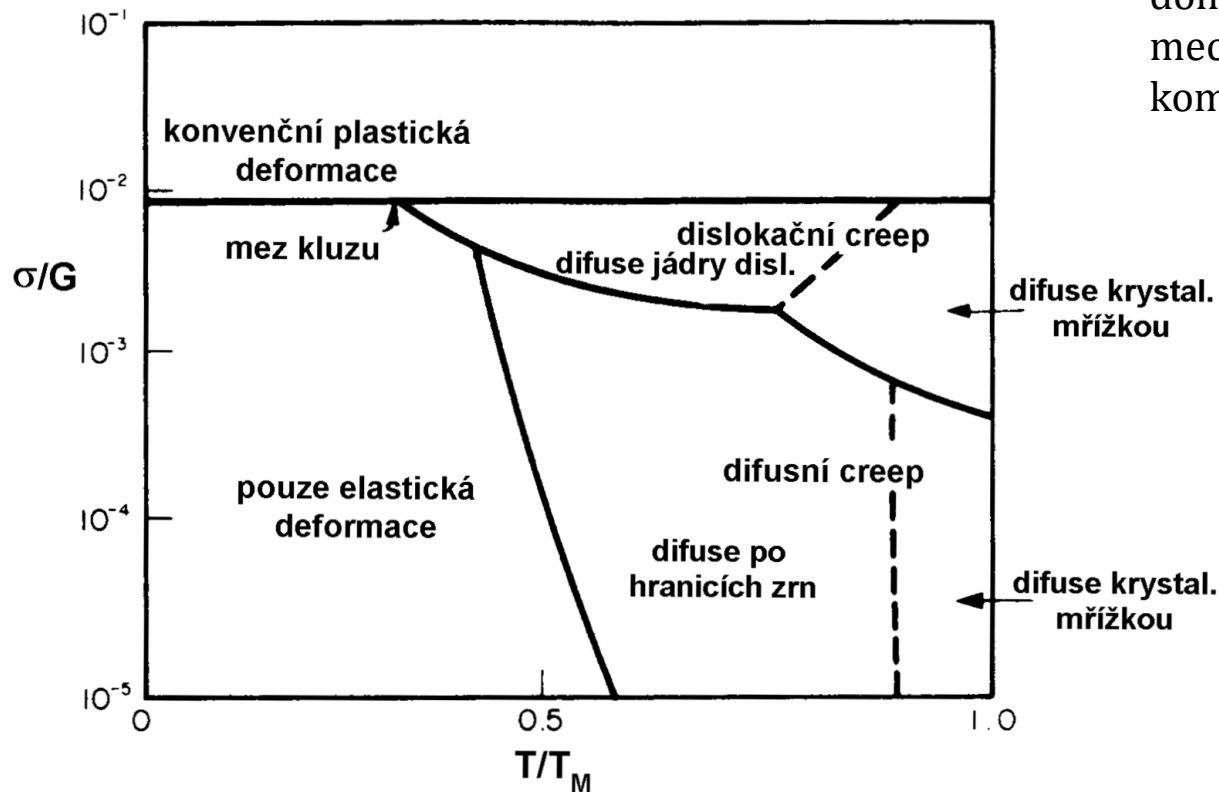
Deformace a lom při creepu – dislokační creep



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

Deformace a lom při creepu

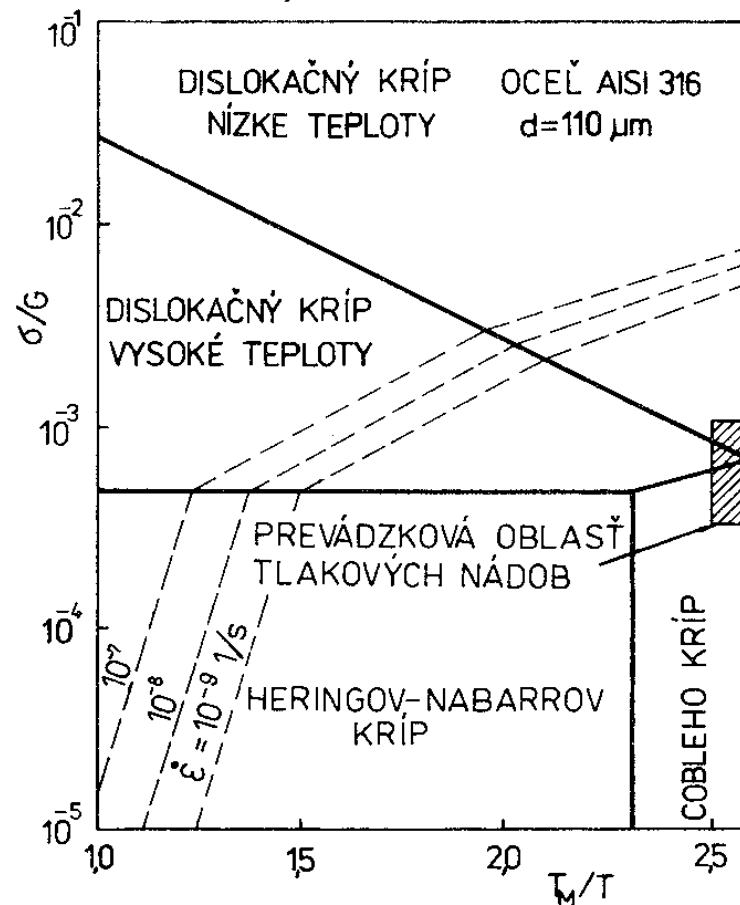
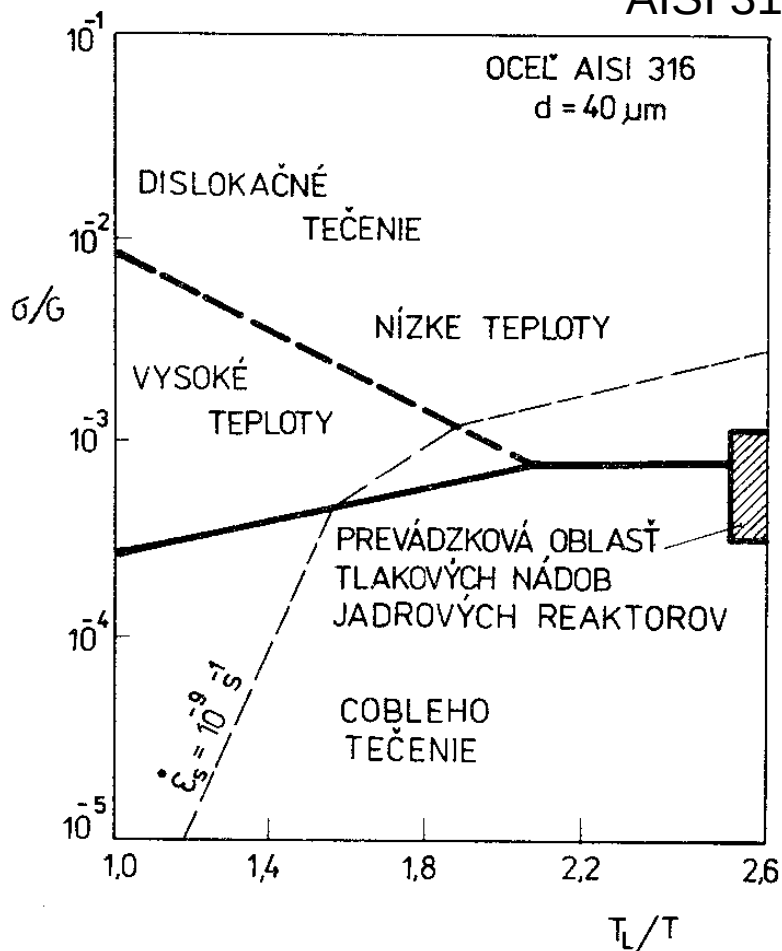
MAPY DEFORMAČNÍCH MECHANISMŮ



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

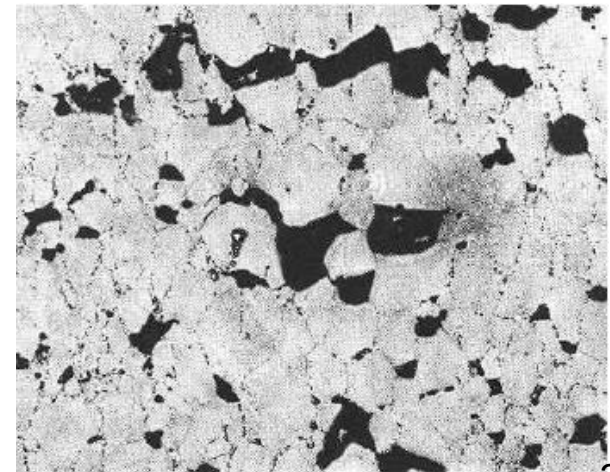
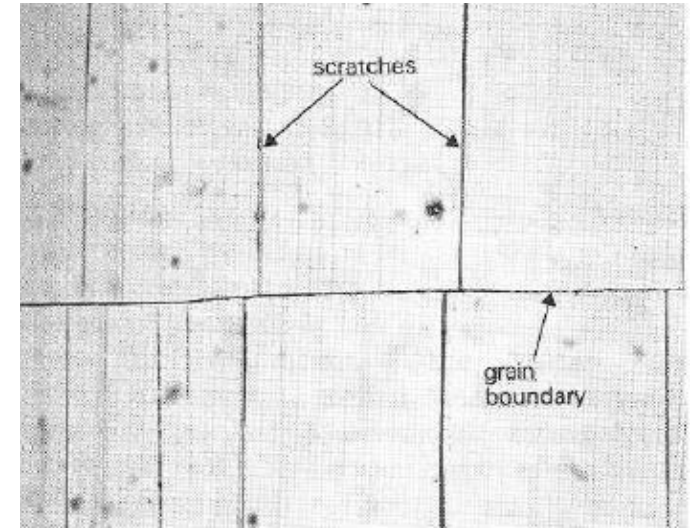
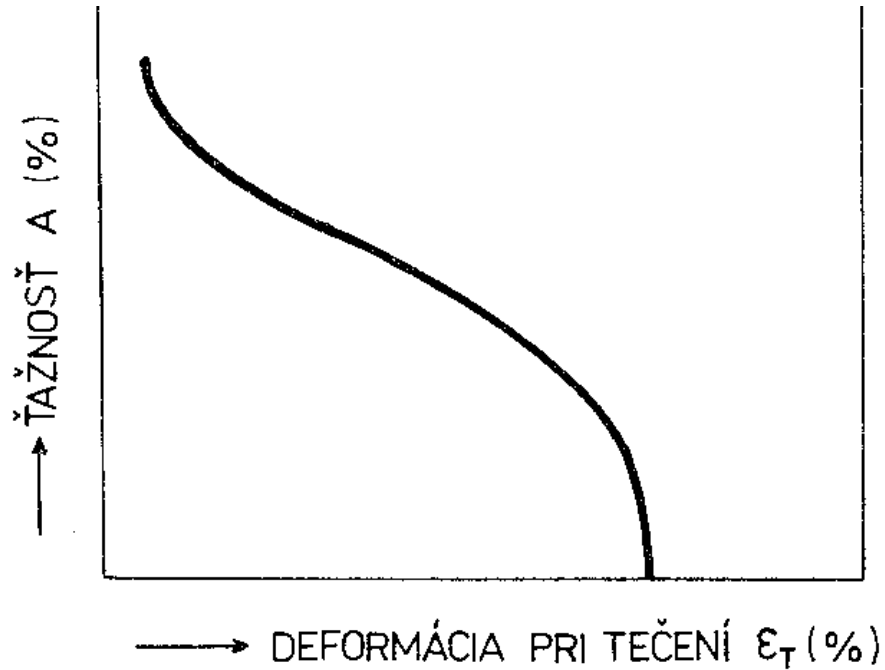
Deformace a lom při creepu

AISI 316 (16Cr-13Ni-2,5Mo)

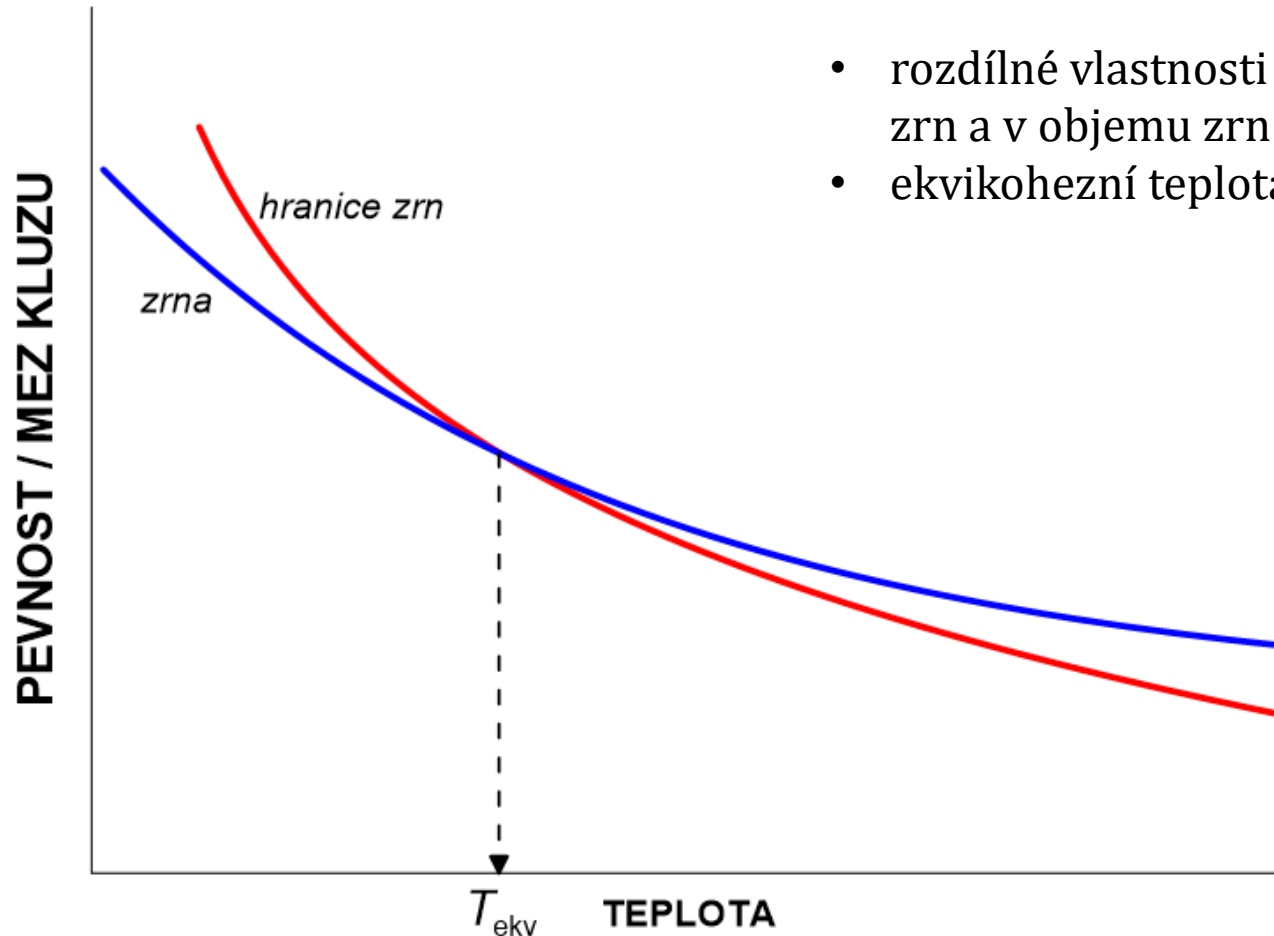


Deformace a lom při creepu

Lom při creepu



Deformace a lom při creepu – lom při creepu



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

Deformace a lom při creepu – lom při creepu



(ekvikohezní teplota)

Transkrystalické lomy

Skluzové roviny jsou slabší než hranice zrn

Interkrystalické lomy

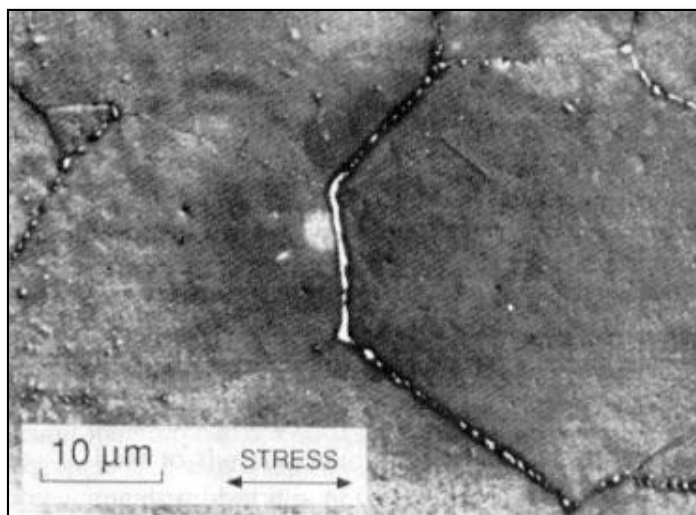
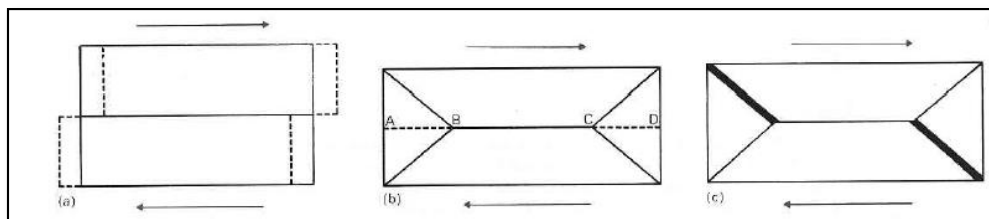
Hranice zrn jsou slabší než skluzové roviny

Průběh lomové čáry přes strukturu

Deformace a lom při creepu – lom při creepu

Klínové trhliny

- vyšší napětí
- nižší teploty



Deformace a lom při creepu – lom při creepu

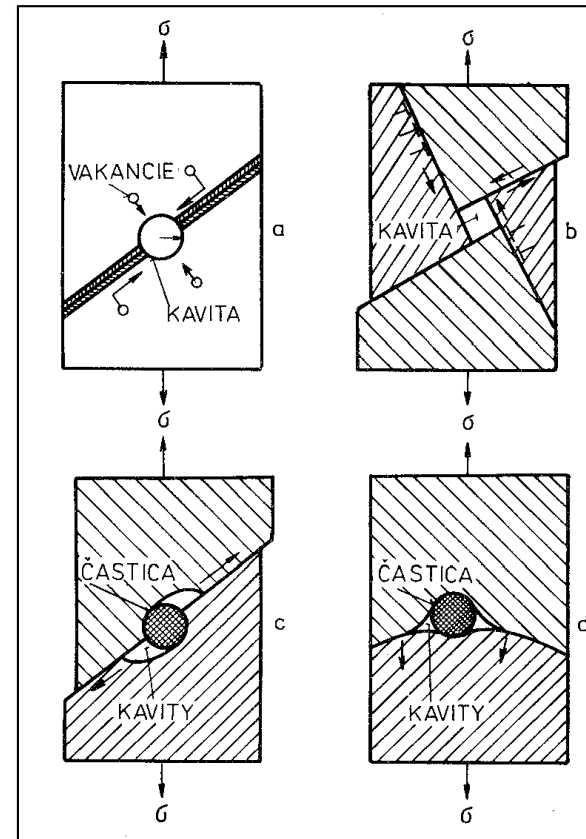
Pokluzu po hranicích zrna



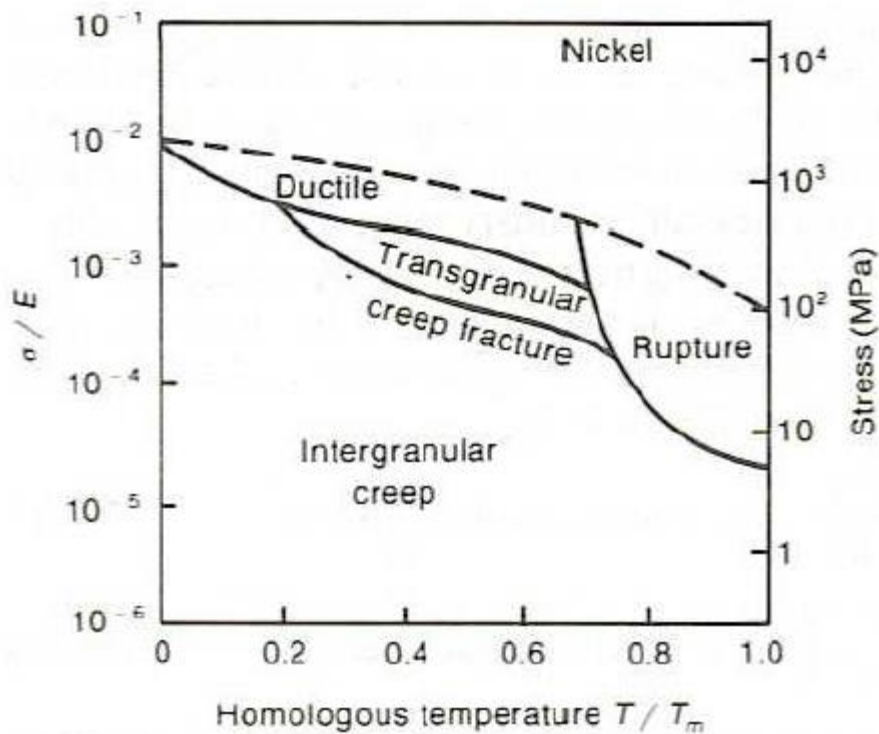
vznik kavit

- nižší napětí
- vyšší teploty

Hranice zrn kolmé na směr
působícího napětí jsou
nežádoucí (nevhodné)



Deformace a lom při creepu – lom při creepu



Lomová mapa niklu

Teplota

Transkrystalické lomy

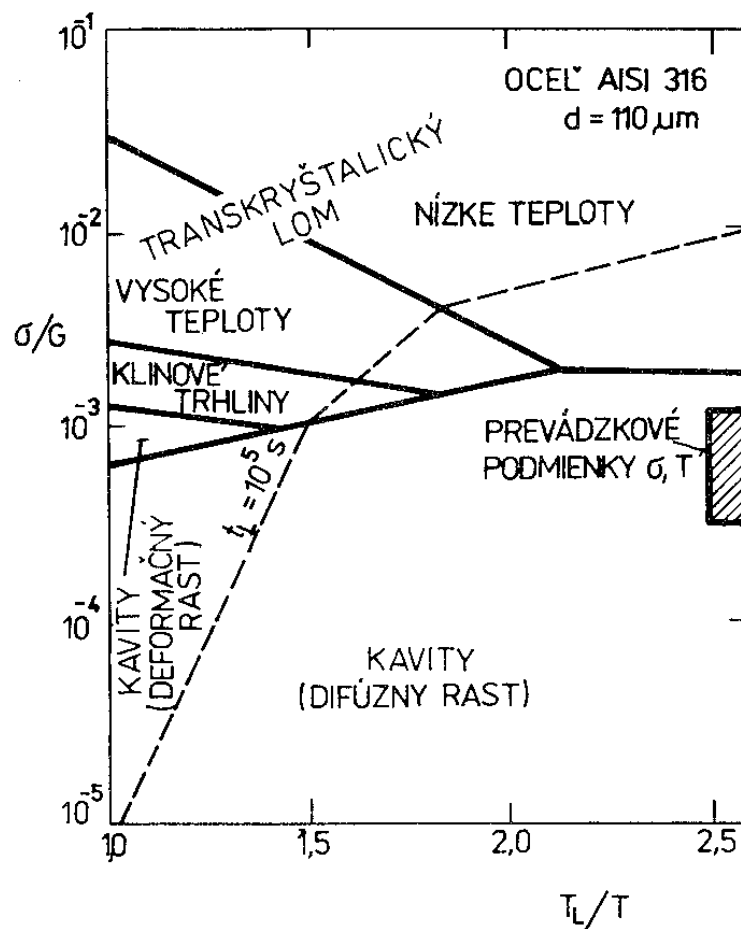
Skluzové roviny jsou slabší než hranice zrn

Interkrystalické lomy

Hranice zrn jsou slabší než skluzové roviny

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

Deformace a lom při creepu – lom při creepu



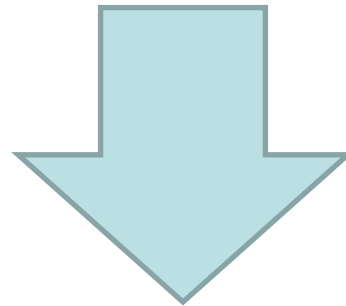
- Teplotní závislost pevnostních vlastností
- Vliv zvýšených teplot na vlastnosti ocelí
- Zkoušení creepového chování
- Charakteristiky odolnosti materiálu vůči creepu
- Deformace a lom při creepu
- **Parametry ekvivalence teploty a času**

Parametry ekvivalence teploty a času

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

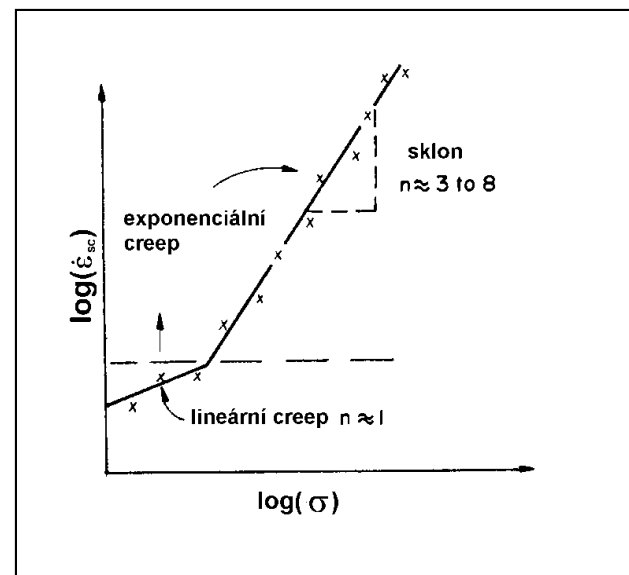
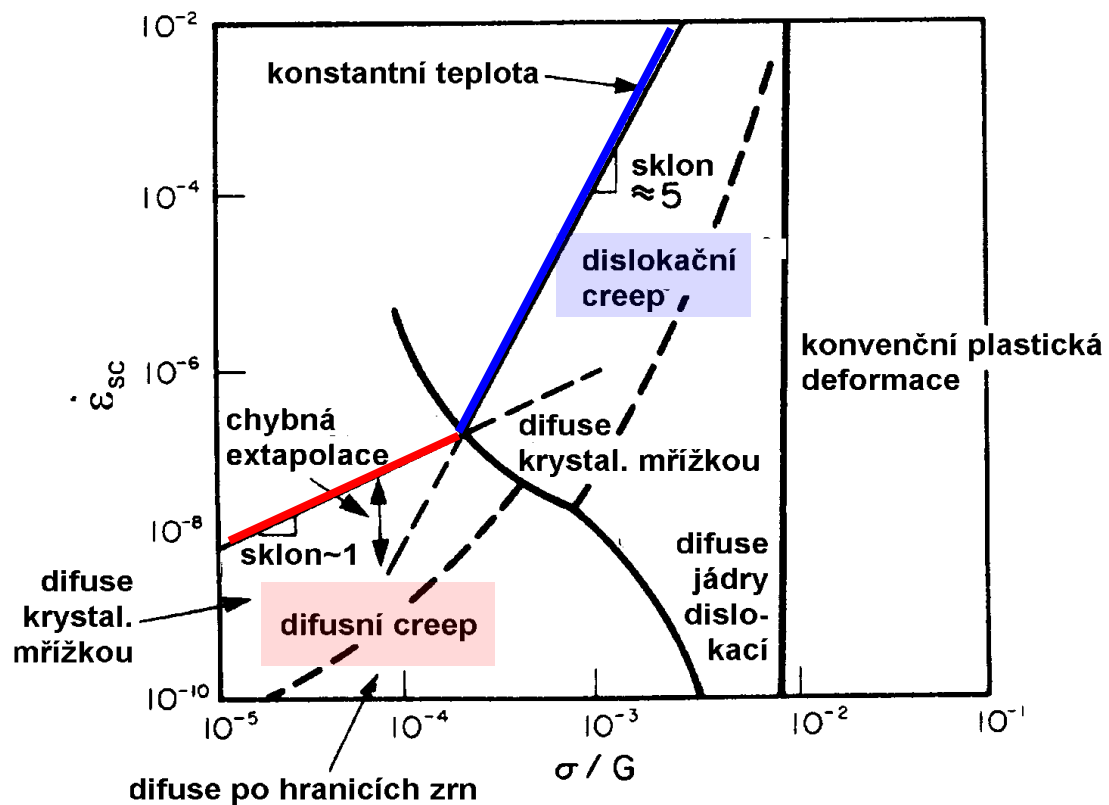
versus

akceptovatelná doba laboratorních zkoušek



extrapolace laboratorních výsledků na reálné konstrukce

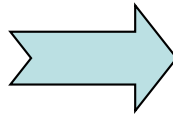
Parametry ekvivalence teploty a času



Parametry ekvivalence teploty a času

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

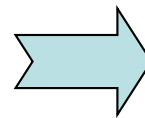
$$\dot{\varepsilon}_{SC} = A\sigma e^{-\frac{Q}{RT}}$$



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

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

po integraci



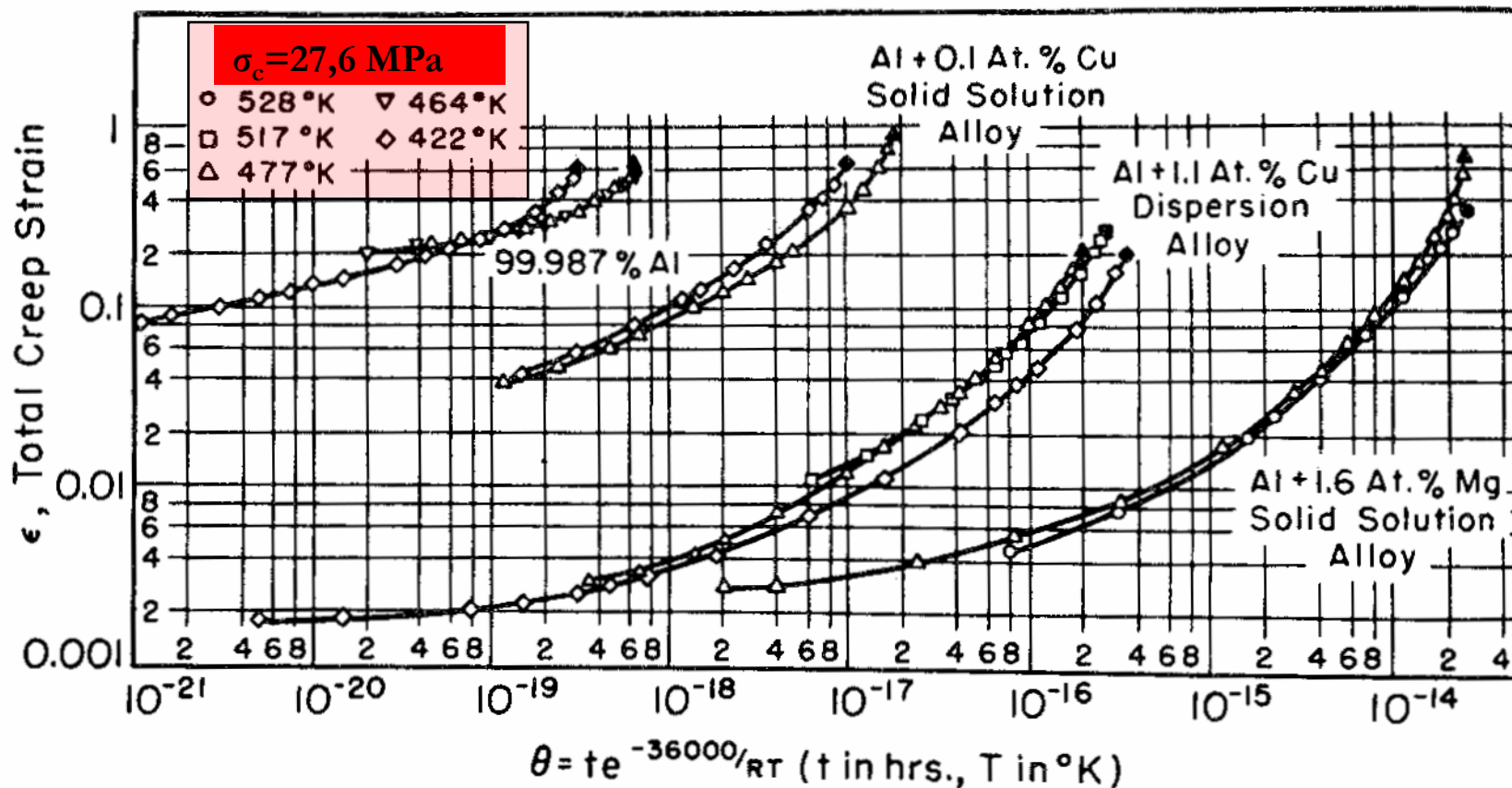
temperature-compensated time



$$\varepsilon_{SC} = A\sigma t e^{-\frac{Q}{RT}}$$

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

Parametry ekvivalence teploty a času



Parametry ekvivalence teploty a času

Sherby-Dorn parameter

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

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

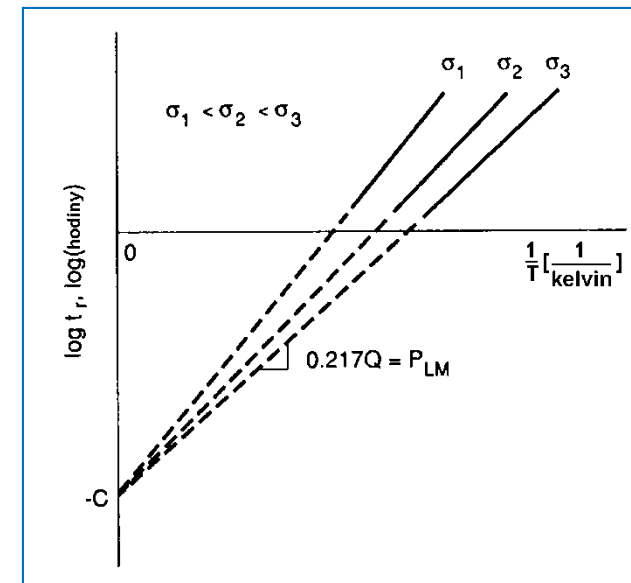
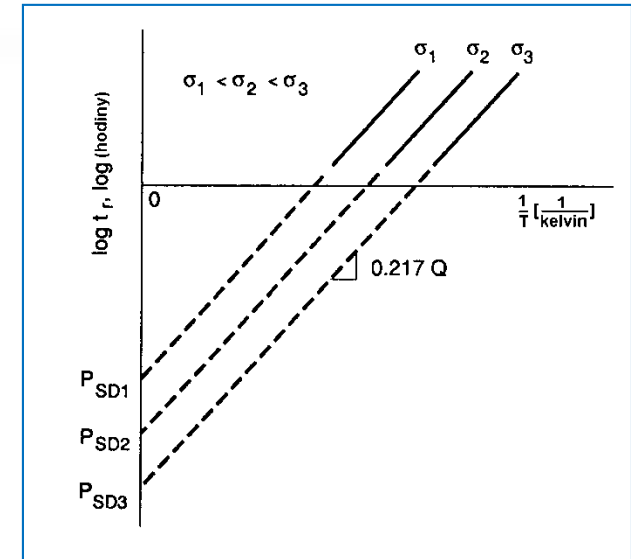
Larson-Miller parameter

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

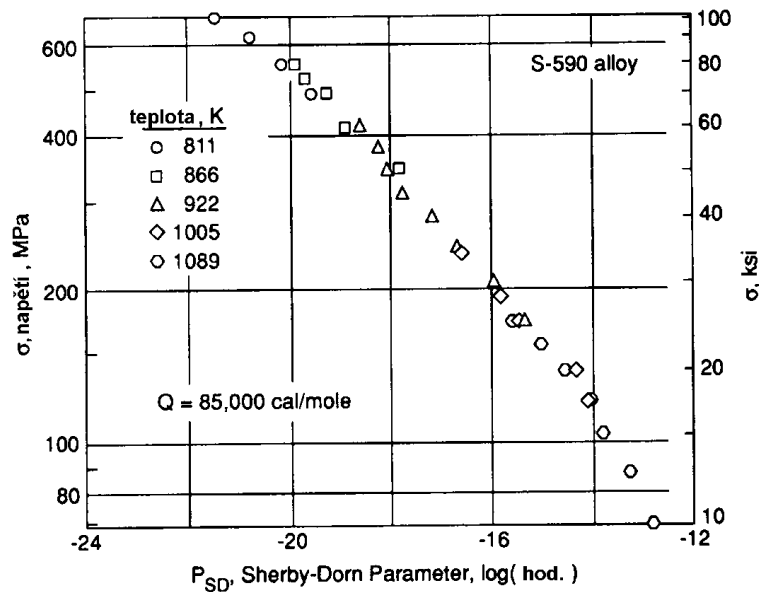
substitute : $\log \theta = -C$

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

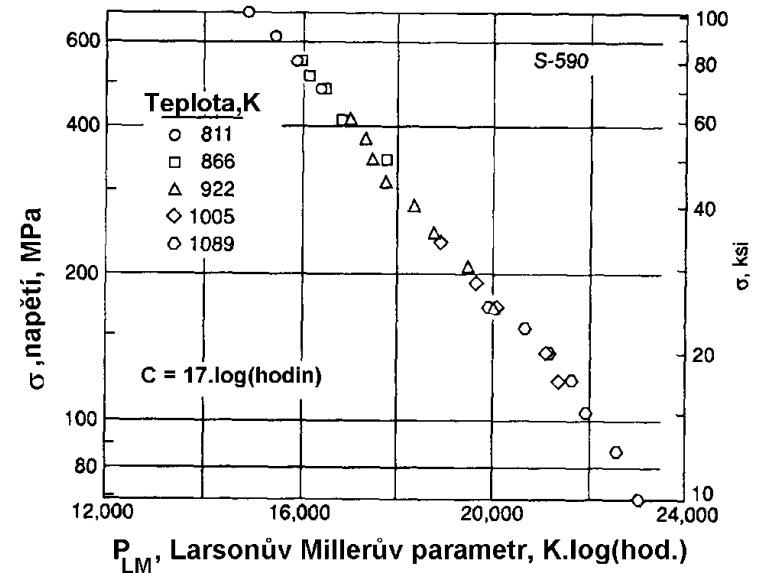
$$P_{LM} = 0,217Q = T[\log t + C]$$



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

Příklad

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

V laboratoři došlo k lomu po 260 hodinách za teploty 530°C.

(Při výpočtu použijte bezpečnostní faktor 10.)

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

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

Pro oceli

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

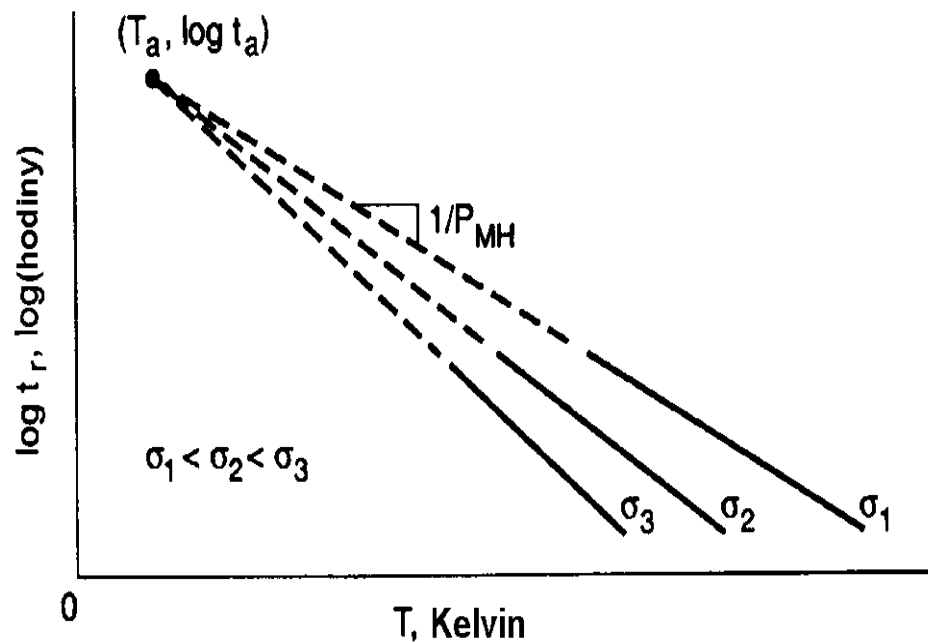
$$P_{LM} = T[\log t + C] = (530 + 273)[\log 260 + 20] = 18 \cdot 10^3$$

$$T = \frac{P_{LM}}{\log(t) + C} = \frac{18 \cdot 10^3}{\log(40 \cdot 24 \cdot 10) + 20} = 715[\text{K}] = 478[^\circ\text{C}]$$

Parametry ekvivalence teploty a času

Manson-Haferd

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



Je nutná znalost alespoň
jedné dvojice bodů.

Parametry ekvivalence teploty a času

TABLE 15.1 SOME VALUES OF CONSTANTS FOR TIME-TEMPERATURE PARAMETERS¹

Material	Sherby-Dorn Q , cal/mole	Larson-Miller C	Manson-Haferd	
			T_a , K	$\log t_a$
Various steels and stainless steels ^{2,3}	$\approx 90,000$	≈ 20	—	—
Pure aluminum and dilute alloys ²	$\approx 36,000$	—	—	—
S-590 alloy (Fe base) ⁴	85,000 ⁵	17	172	20
A-286 stainless steel ⁴	91,000	20	367	16
Nimonic 80A (Ni base) ⁴	91,000	18	311	16
1Cr-1Mo-0.25V steel ⁴	110,000	22	311	18

Note: ¹Values given are for temperatures T in kelvins (K) and rupture times t_r in hours.

Sources: ²Values in [Orr 54]. ³Value in [Larson 52]. ⁴Values in [Goldhoff 59a] and [Goldhoff 59b]. ⁵Revised value from [Conway 69].