

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA STROJNÍ



# VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ

## CREEP

doc. Ing. Halama Radim, Ph.D.  
Ing. František Fojtík, Ph.D.  
Ing. Martin Fusek, Ph.D.  
Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.  
Dr. Ing. Ludmila Adámková

Ostrava 2013

© doc. Ing. Halama Radim, Ph.D., Ing. František Fojtík, Ph.D., Ing. Martin Fusek, Ph.D., Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D., Dr. Ing. Ludmila Adámková

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3027-8



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

## OBSAH

<b>1</b>	<b>VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ MATERIÁLU .....</b>	<b>3</b>
1.1	ÚVOD: Základy creepu (tečení) .....	4
1.1.1	Základní pojmy .....	4
1.1.2	Creep .....	5
1.1.3	Ukázka základního výpočtu creepu – tyč zatížená silou .....	6
1.1.4	Životnost při creepu – Larson-Millerův parametr .....	7
1.1.5	Relaxace .....	7
1.1.6	Vliv teploty .....	8
1.1.7	Fyzikální pozadí creepu .....	9
1.1.8	Viskózní creep .....	10
1.1.9	Porušování a lom při creepu .....	10
1.1.10	Zkoušky creepu .....	12
1.1.11	Závěrečné shrnutí .....	13
<b>2</b>	<b>POUŽITA LITERATURA .....</b>	<b>14</b>



# 1 VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ MATERIÁLU



## OBSAH KAPITOLY:

Základní pojmy

Vliv teploty

Fyzikální pozadí

Porušování a lom při creepu

Zkoušky creepu a relaxace

Shrnutí poznatků



## MOTIVACE:

Řada strojních součástí v technické praxi je provozována za vysokých teplot, například parní turbíny, tryskové a raketové motory, nukleární reaktory, tlakové nádoby, kotle a pod. U materiálů pro tyto konstrukce jsou rozhodující mechanické vlastnosti ne za normálních, ale za zvýšených teplot. Od jisté teploty dochází k nárůstu plastické deformace s časem i při konstantním zatížení, mluvíme tzv. creepu (čti kríp).



## CÍL:

Tečení kovových materiálů – creep.

Zkoušky tečení a relaxace.



## 1.1 ÚVOD: ZÁKLADY CREEPU (TEČENÍ)

V této kapitole se seznámíme se základy creepu. Český překlad tohoto jevu je tečení, tento název se ovšem pro popis tohoto jevu používá zřídka. I v české odborné literatuře se používá obvykle pojem creep a tečení je pouze český ekvivalent. Pojem tečení můžeme použít také k popisu nebo vysvětlení pojmů v hydromechanice, kdežto pojem creep je spojen výhradně s popisem jevu, který si v této kapitole přiblížíme.

### 1.1.1 Základní pojmy

Nejprve začneme zopakováním pojmů, které jsou důležité pro pochopení látky v této kapitole. K popisu změny tvaru používáme posuvy a natočení nebo poměrné prodloužení a zkos. Posuvy a natočení jsou veličiny, které lze sledovat při měření – popisují chování z „inženýrského“ hlediska. Naopak poměrné prodloužení případně zkos, jsou veličiny výhodnější při matematickém popisu problému. Například lano zatížené silou se prodlouží o délku  $\Delta l$  (posunutí konce lana po zatížení vůči nezatíženému stavu) – tato hodnota reprezentuje posuv konce lana, což si můžeme snadno představit v praxi. Naopak poměrné prodloužení popisuje hodnotu deformace ve vybraném bodu lana a neříká nic o „celkovém“ chování součásti. „Celkové“ chování součásti pak obvykle počítáme pomocí integrace. V této kapitole, pokud budeme hovořit o deformaci, budeme myslet poměrné prodloužení.

Poměrné prodloužení můžeme popsat dvojím způsobem:

- Pro malé deformace (zanedbatelné vůči rozměrům daného tělesa) platí  $\varepsilon = \int \frac{dl}{l_0} \approx \frac{\Delta l}{l_0}$ , což můžeme nazvat např. (smluvní) poměrné podélné prodloužení.
- Pro velké deformace (např. při tváření) používáme skutečné poměrné prodloužení, nebo také logaritmické poměrné prodloužení  $\varepsilon_S = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon)$ .

U většiny strojírenských aplikací se používá smluvní poměrné prodloužení, rozdíl mezi smluvním a skutečným poměrným prodloužením je u malých deformací zanedbatelný. Definice, i práce se smluvním poměrným prodloužením je snadnější, proto se v praxi používá častěji. Skutečné (logaritmické) poměrné prodloužení se používá ve speciálních oblastech, kde je nutný přesný popis, a vyskytují se velké deformace.

Poznámka: podobné „dělení“ se vyskytuje také u napětí. Napětí smluvní je vztaženo k počátečnímu průřezu, napětí okamžité k okamžitému průřezu, viz tahová zkouška (také napětí normálové, smykové, hlavní atd.).

V předchozích kapitolách se deformace (celková)  $\varepsilon_{\text{Celková}}$  dělila také na elastickou  $\varepsilon_e$  (vratnou) a plastickou  $\varepsilon_p$  (nevratnou – trvalou) část  $\varepsilon_{\text{Celková}} = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ . V této kapitole se budeme zabývat také trvalou deformací, která je ale, na rozdíl od plastické deformace vysvětlené v předchozích kapitolách, rozložena v čase. Budeme tedy mluvit o rychlosti deformace  $\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon}$ . Plastickou (trvalou) deformaci pak můžeme rozdělit na část závislou pouze na velikosti zatížení, a část závislou na velikosti zatížení a době, po kterou zatížení působí. Deformaci závislou na čase - náležející ke creepu budeme označovat  $\varepsilon_c$ .

Fyzikální příčiny creepu často souvisí s difuzí poruch mřížky. Difuzí nazýváme přesun atomů nebo iontů na vzdálenost větší než je meziatomová vzdálenost. Bodové poruchy krystalové mřížky jsou vakance (neobsazené místa mřížky), substituční a intersticiální atomy. Čárové poruchy krystalové mřížky jsou dislokace. Dislokace byly podrobněji vysvětleny

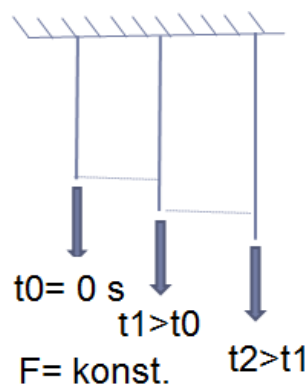


v předchozích kapitolách – tedy pouze stručně. Dislokace jsou poruchy probíhající krystalovou mřížkou a můžeme si je představit jako rozhraní mezi posunutou a neposunutou částí krystalu (dislokace hranové a šroubové). Dislokace se pohybují zejména skluzem, překročí-li smykové napětí v určité rovině mezní hodnotu. Skluzové roviny jsou mřížkové roviny nejhustěji obsazené atomy. Hranové dislokace se mohou za vyšších teplot pohybovat kolmo ke směru skluzu – tzv. šplháním. Šplhání dislokace zahrnuje dva procesy: absorpci (pohlcení) nebo emisi (vytvoření) vakancí dislokací a difuzi (přesun) vakancí.

S creepem také souvisí dynamické zotavení – zjednodušeně můžeme říci, že zotavení kompenzuje účinky deformačního zpevnění.

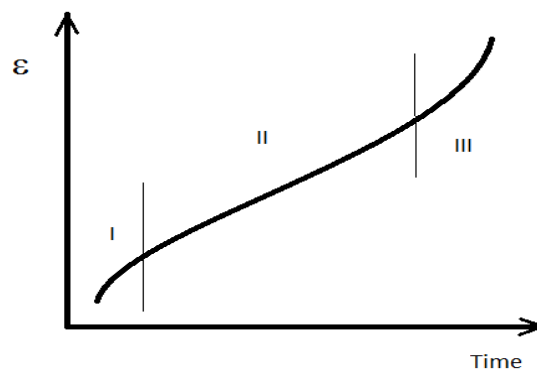
### 1.1.2 Creep

Creep (tečení) je deformace závislá na čase. Známým příkladem je rozpálená asfaltová silnice v létě. Pokud se na ni postavíme, za určitou dobu se zaboříme do vozovky. Deformace roste s rostoucím časem  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ , ačkoliv zatížení  $F$  je konstantní po celou dobu zatěžování viz Obr. 1.



Obr. 1 Délka roste s časem při konstantním zatížení.

Závislost deformace na čase je obvykle popisována pomocí creepové křivky. Její typický tvar je na Obr. 2.



Obr. 2. Creepová křivka.

Na křivce jsou patrné tři oblasti creepu:

I. primární creep - rychlost creepu s časem klesá

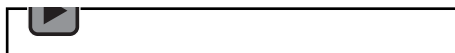
II. sekundární creep (stacionární creep) – rychlost creepu se s časem nemění  $\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = \text{konst.}$

III. terciální creep – rychlost creepu vzrůstá z důvodů růstu napětí nebo metalurgických změn struktury. Třetí stádium končí lomem.





Audio 1.1



Creepovou křivku popisujeme pomocí tzv. konstituční rovnice. Konstituční rovnice je funkce např. ve tvaru  $\varepsilon_c = f(\sigma, T, \dot{\varepsilon}, t)$ . Pro popis creepové křivky se používá např.  $\varepsilon_c = \varepsilon_0 + \beta t^{\frac{1}{3}} + \dot{\varepsilon}_s t + \gamma t^3$ , kde  $\varepsilon_0$  je deformace v čase 0,  $\beta$  a  $\gamma$  jsou konstanty,  $t$  je čas a  $\dot{\varepsilon}_s$  je rychlost stacionárního creepu. Pro popis sekundárního creepu (konstantní rychlost creepu) se často používá Nortonův vztah  $\dot{\varepsilon} = A\sigma^n$ , kde  $A$  a  $n$  jsou materiálové konstanty, viz Tab. 1 [4].

Tab. 1.

Materiál	Chemické složení	Teplota zkoušky [°C]	$A \left[ \left( \frac{10}{\text{MPa} \cdot \text{hod}} \right)^n \right]$	$n [-]$
Uhlíková ocel	0.15C, 0.5Mn, 0.23Si, 0.032S, 0.025P	427	$3.63 \cdot 10^{-27}$	6.24
		538	$1.30 \cdot 10^{-14}$	3.04
		593	$2.04 \cdot 10^{-13}$	3.18
		649	$8.45 \cdot 10^{-12}$	3.03
Molybdenová ocel	0.13C, 0.49Mn, 0.25Si, 0.010S, 0.011P, 0.52Mo	482	$3.27 \cdot 10^{-23}$	5.28
		538	$2.82 \cdot 10^{-20}$	4.71
		593	$8.44 \cdot 10^{-16}$	3.77
		649	$1.44 \cdot 10^{-13}$	3.19

Creepové křivky se mohou od výše uvedené lišit:

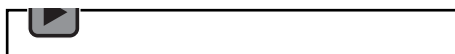
- V některých případech může oblast II (stacionární creep) vymizet.
- Při vyšších teplotách (v závislosti na druhu materiálu) může vymizet oblast I primárního creepu.
- V některých případech se objevuje oblast inverzního creepu (v oblasti I primárního creepu), kdy rychlost creepu s časem vzrůstá.

### 1.1.3 Ukázka základního výpočtu creepu – tyč zatížená silou

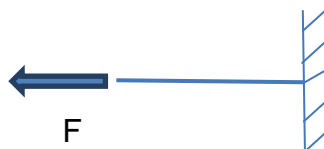
Relativně jednoduše lze počítat oblast stacionárního creepu  $\frac{d\varepsilon_c}{dt} = \dot{\varepsilon} = \text{konst.}$ . K výpočtu se používá Nortonův vztah.



Audio 1.2



Budeme řešit jednoduchou úlohu – tyč zatíženou osovou silou (prostý tah), viz Obr. 3. Napětí při zatížení nepřekročí mez kluzu, bude tedy platit Hookův zákon. Poměrné prodloužení se bude tedy skládat z elastické (vratné) a creepové části. Postup výpočtu je naznačen v Tab. 2 [5].



Obr. 3. Schéma řešené úlohy



Tab. 2.

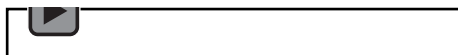
Nortonův vztah:	$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = A \cdot \sigma^n$ z toho plyne $\varepsilon_c = \int_{(t)} A \cdot \sigma^n dt$
Hookův zákon:	$\sigma = E \cdot \varepsilon_e$
Napětí při tahu:	$\sigma = \frac{F}{S}$
Definice poměrného prodloužení:	$\varepsilon = \frac{\Delta dy}{dy}$
Poměrné prodloužení: $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_c$ (zátížení není funkcí času)	$\varepsilon = \varepsilon_e + \int_{(t)} A \cdot \sigma^n dt = \frac{F}{E \cdot S} + A \cdot \left(\frac{F}{S}\right)^n \cdot t = \frac{\Delta dy}{dy}$
Prodloužení prutu:	$\Delta L = \int_0^L \frac{F}{E \cdot S} + A \cdot \left(\frac{F}{S}\right)^n \cdot t dy$ $\Delta L = \left(\frac{F}{E \cdot S} + A \cdot \left(\frac{F}{S}\right)^n \cdot t\right) \cdot L$

### 1.1.4 Životnost při creepu – Larson-Millerův parametr

Creepové zkoušky probíhají dlouhou dobu – obvykle jde o tisíce hodin – měsíce. V praxi ale mnoho součástí musí fungovat roky, tedy 100000h což je zhruba 11 let. Data ze zkoušek se tedy extrapolují na větší časové intervaly. Jeden z často používaných způsobů řešení využívá tzv. Larson – Millerův parametr. Základní rovnice má tvar:  $P_{LM} = T(\log(t_r) + C)$ , kde  $C$  je materiálový parametr,  $P_{LM}$  je Larson – Millerův parametr,  $T$  je teplota [K] a  $t_r$  je čas [h] do lomu. Postup řešení je naznačen v tab. 3.



Audio 1.3



Tab. 3

Popis kroku	Rovnice a výsledky
Na základě experimentu, nebo z literatury (grafy, tabulky apod.) stanovíme $C$ , $P_{LM}$ .	$C = 20$ [log(h)] $P_{LM} = 20000$
Můžeme zjistit životnost při teplotě $T = 800$ K	$\log t_r = \frac{P_{LM}}{T} - C = \frac{20000}{800} - 20 = 8$ $t_r = 10^{\log t_r} = 10^8 h$
Nebo teplotu pro životnost $t_r = 10^7 h$	$T = \frac{P_{LM}}{\log t_r + C} = \frac{20000}{7 + 20} = 740 K$

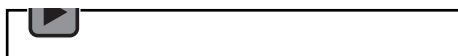
Materiálové parametry se stanovují na základě experimentů (zkoušek creepu – viz předchozí kapitola). V literatuře je lze najít pro různé materiály ve formě grafů nebo tabulek.

### 1.1.5 Relaxace

Velice blízko ke creepu má relaxace. Relaxace napětí je snižování napětí v čase, (například u předepjatých šroubů musíme s vlivem relaxace počítat a po určité době šrouby znovu přitáhnout, podobně u nalisovaných nádob). U ocelí k relaxaci dochází za vyšších teplot (pro oceli nad 400°C).



Audio 1.4



Provázanost mezi relaxací a creepem je zřejmá z jednoduchého výpočtu. Tyč (např. předepjatý šroub) zatížená konstantní deformací  $\varepsilon = konst.$  Napětí se pohybují pod mezi



kluzu, plastická složka deformace je tedy nulová. Pro celkovou poměrnou deformaci platí:  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_c$ , kde  $\varepsilon_e$  je elastická složka,  $\varepsilon_c$  je složka odpovídající creepu (v čase  $t=0$  je nulová) a  $\varepsilon$  je počáteční (konstantní) hodnota.

(Převzato z [5]) Po derivaci a dosazení Hookova zákona (elastické) a Nortonovy rovnice (Creep) získáme:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_e}{dt} + \frac{d\varepsilon_c}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + A \cdot \sigma^n.$$

Počáteční deformace  $\varepsilon = konst.$ , musí tedy platit:  $0 = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + A \cdot \sigma^n$ .

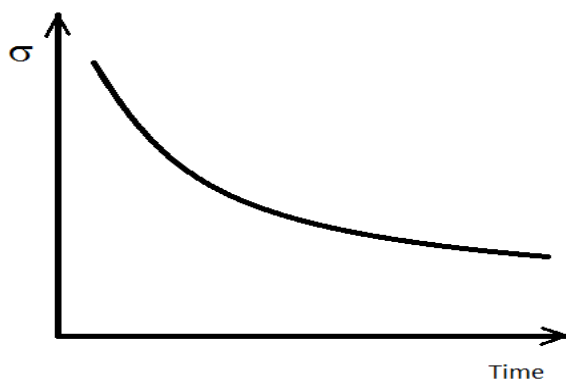
Rovnici upravíme  $\int \frac{d\sigma}{\sigma^n} = - \int E \cdot A \cdot dt$  a integrujeme  $\frac{\sigma^{1-n}}{n-1} = -E \cdot A \cdot t + C$ .

Integrační konstantu  $C$  určíme z počátečních podmínek při čase  $t=0$ , tedy  $C = \frac{\sigma_0^{n-1}}{n-1}$ .

Po úpravě  $\sigma^{1-n} = \sigma_0^{n-1} - E \cdot A \cdot t \cdot (n-1)$  získáme výslednou rovnici:

$$\sigma(t) = \left( \sigma_0^{n-1} - E \cdot A \cdot t \cdot (n-1) \right)^{\frac{1}{1-n}}.$$

Rovnice popisuje snižování napětí s časem, viz Obr. 7.



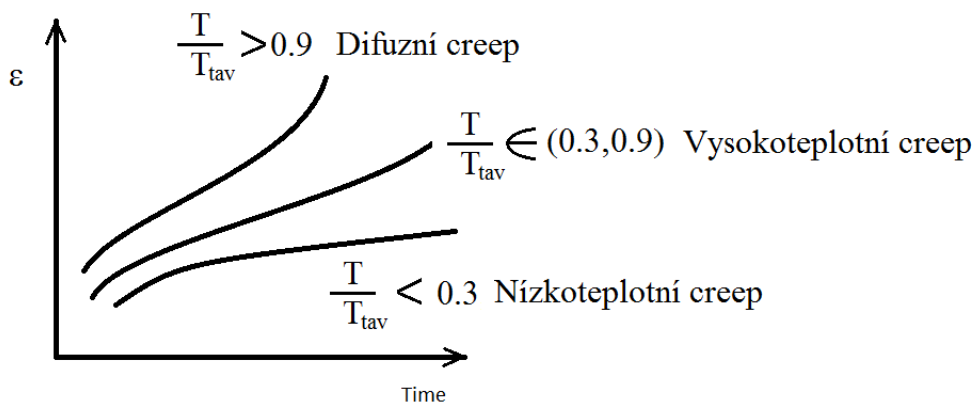
Obr. 7. Relaxace napětí.

### 1.1.6 Vliv teploty

Creep způsobují procesy, které jsou silně ovlivněny teplotou. S rostoucí teplotou se zvyšuje rychlost deformace  $\dot{\varepsilon}$ . Můžeme vyjít z Arrheniovy rovnice  $\dot{\varepsilon} = A \sigma^n \exp \left[ -\frac{Q}{RT} \right]$ . Vliv teploty je naznačen na Obr. 8.







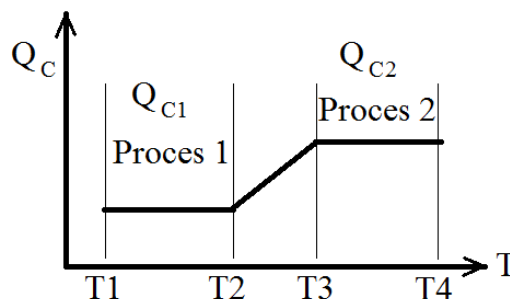
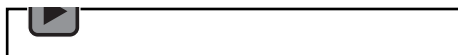
Obr. 8. Vliv teploty na creepovou křivku.

K popisu se používá tzv. homologická teplota, což je poměr dané teploty a teploty tavení  $\frac{T}{T_{tav}}$ .

Rostoucí teplota ovlivňuje také mechanismus, kterým creep probíhá. S tím souvisí tzv. aktivační energie creepu  $Q_c$ . Přebývá-li v intervalu teplot  $T_1 - T_2$  mechanismus creepu charakterizovaný aktivační energií  $Q_{c1}$ , rychlost creepu je  $\dot{\epsilon}_1 = \epsilon_0 \exp\left[-\frac{Q_{c1}}{kT}\right]$ . Přebývá-li v intervalu teplot  $T_3 - T_4$  mechanismus creepu charakterizovaný aktivační energií  $Q_{c2}$ , rychlost creepu je  $\dot{\epsilon}_2 = \epsilon_0 \exp\left[-\frac{Q_{c2}}{kT}\right]$ . V oblasti teplot  $T_2 - T_3$  se oba mechanismy uplatňují stejnou měrou, viz Obr. 9.



Audio 1.5



Obr. 9. Změna aktivační energie v závislosti na teplotě.

V rovnicích je  $Q_{c1}$ ,  $Q_{c2}$  aktivační energie creepu,  $\epsilon_0$  frekvenční faktor,  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je teplota (v Kelvinech).

### 1.1.7 Fyzikální pozadí creepu

Z fyzikálního hlediska se tedy na procesu, který nazýváme creep podílí mnoho různých deformačních mechanismů v závislosti na teplotě, zatížení či druhu materiálu. U krystalických materiálů tyto mechanismy můžeme rozdělit do několika skupin:

- Dislokační skluz bez zotavení (pro malé rychlosti) - (A)
- Creep řízený zotavením - Dislokační creep – difuze dislokací - zotavení dislokací (dislokace se vzájemně zruší)



- difuze mřížkou  $\dot{\epsilon} = A_L \frac{1}{b^2} D_L \left(\frac{\sigma}{G}\right)^3 \frac{G\Omega}{kT}$  (C)

- difuze jádry  $\dot{\epsilon} = A_c \frac{1}{b^2} D_c \left(\frac{\sigma}{G}\right)^5 \frac{G\Omega}{kT}$  (B)

- Difuzní creep – difuze bez účasti mřížkových dislokací, difuze vakancí.

- difuze mřížkou (Nabarrův-Heringův creep)  $\dot{\epsilon} = 14 \frac{D_L \sigma G \Omega}{d^2 kT}$  (D)

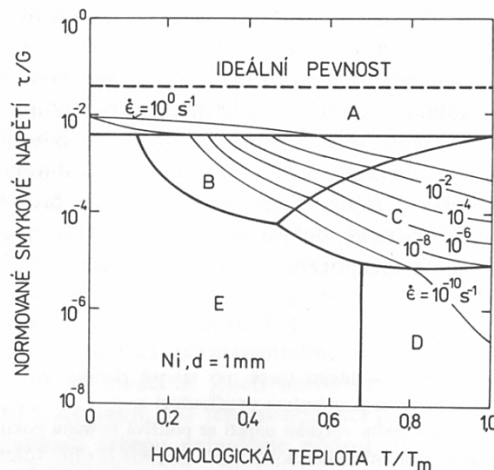
- difuze hranicemi zrn (Cobleův creep)  $\dot{\epsilon} = 44 \frac{D_B \sigma G \Omega}{d^3 kT}$  (E)

- Atd.

Chování materiálu pak popisuje tzv. deformační mapa. Deformační mapa poskytuje informaci o tom, který z deformačních mechanismů bude k rychlosti deformace přispívat rozhodující měrou. Deformační mapu pro čistý nikl, střední průměr zrna  $d = 1$  mm, ukazuje Obr. 10. ( $G$  je modul pružnosti ve smyku).



Audio 1.6



Obr. 10. Deformační mapa [1]

### 1.1.8 Viskózní creep

Některé materiály se chovají jako viskózní kapaliny. Týká se to zejména amorfních materiálů (skla, některé polymery apod.). Rychlost deformace pak počítáme pomocí viskozity pro smykové nebo normálové zatížení:  $\eta_\tau = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$  nebo  $\eta = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}}$ , kde  $\eta$  ( $\eta_\tau$ ) je viskozita (smyková viskozita),  $\sigma$  ( $\tau$ ) je normálové napětí (smykové napětí) a  $\dot{\epsilon}$  ( $\dot{\gamma}$ ) je rychlost deformace (rychlost smykové deformace – zkosu, udává se v [rad/s]). Pro ideálně viskózní kapaliny (nestlačitelné) uvažujeme  $3 \eta_\tau = \eta$ .

### 1.1.9 Porušování a lom při creepu

Při homologické teplotě vyšší než 0.4 nastoupí dříve či později třetí stádium creepu, které končí lomem.

Lom při creepu můžeme rozdělit do dvou základních částí:



- Při vysokých napětích se vyskytuje lom vnitrokystalický (transkrystalický lom). Dochází k velkému poměrnému prodloužení, velké kontrakci (odpovídá tvárnému lomu).
- Při nízkých napětích se vyskytuje lom mezikrystalový (interkrystalický lom). Tento můžeme ještě rozdělit:
  - Kavitační porušení – k porušení dochází vznikem kavít (zárodků trhlin) na hranicích zrn zhruba kolmých na osu aplikovaného napětí.
  - Trhlinové porušení – k porušení dochází vznikem trhlin ve stycích 3 zrn, jejich růstem a spojování.

Proces mezikrystalového kavitačního porušování lze rozdělit do pěti stádií:

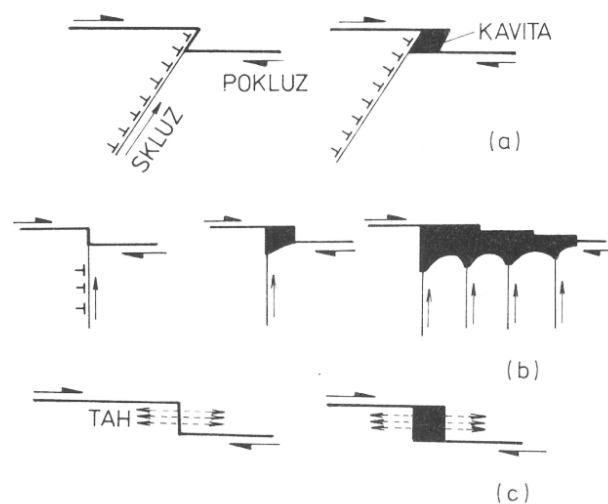
- 1) Nukleace kavít.
- 2) Růst kavít.
- 3) Spojování kavít, vznik trhlin.
- 4) Šíření magistrální (hlavní) trhliny.
- 5) Konečný lom.



Audio 1.7



Různé modely vzniku kavít jsou ukázány na následujícím Obr. 11.



Obr. 11. Modely nukleace kavity a/ Givkinsův, b/ Daviesův a Williamsův, c/ Chenův a Machlinkův [1].



Proces mezikrystalového trhlinového porušování lze rozdělit podobně:

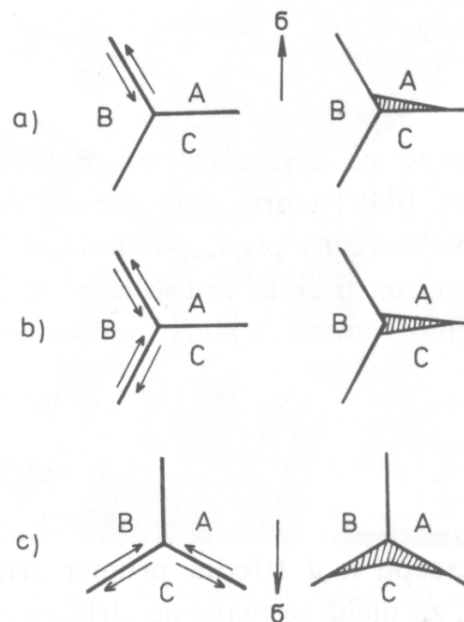
- 1) Nukleace trhliny.
- 2) Pokračující pokluzu.
- 3) Plastická deformace zrn (čelo trhliny).
- 4) Kondenzací vakancí před čelem trhliny a přemístění atomů na hranici zrna. Nukleací a růstem kavit před čelem trhliny a jejich spojováním s trhlinou.
- 5) Šíření magistrální (hlavní) trhliny. Konečný lom.



Audio 1.8



Různé možnosti vzniku trhlin jsou ukázány na následujícím Obr. 12.



Obr. 12. Možnosti nukleace trhlin na styku tří zrn. Směr pokluzu je znázorněn šipkami [1].

### 1.1.10 Zkoušky creepu

Zkoušení creepu se provádí dvěma způsoby:

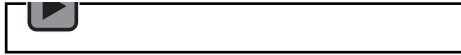
- Konstantní napětí – v průběhu zkoušky se snižuje velikost aplikované síly tak, aby napětí během zkoušky zůstalo konstantní. V tomto případě se zkouška ukončí po určité době, pokud nedojde k porušení. Schématický popis zkoušky: Na zkušební vzorek – tyč je zavěšeno břemeno zvláštního tvaru. Toto závaží je ponořeno do kapaliny. Zkušební vzorek je zatížen tahem. V průběhu zkoušky se tyč prodlužuje a závaží se potápí do kapaliny stále více. Na větší část ponořeného závaží působí větší vztlková síla, která snižuje zatížení vzorku tak, aby napětí ve vzorku mělo konstantní hodnotu.



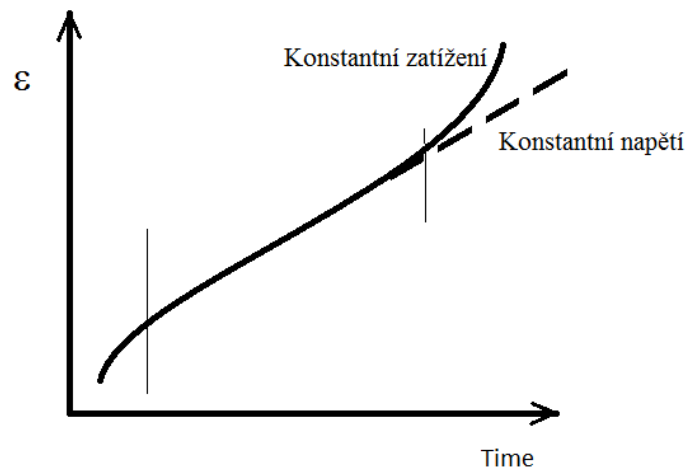
- Konstantní zatížení – v průběhu zkoušky se vlivem zmenšujícího se průřezu zvyšuje napětí. Dochází k růstu napětí i rychlosti deformace až do porušení. Schématický popis zkoušky: Na zkušební vzorek – tyč je zavěšeno břemeno, které po celou dobu zkoušky zatěžuje vzorek stejnou silou. Zkušební vzorek je zatížen tahem.



Audio 1.9



Rozdíl mezi oběma typy zkoušek je patrný také z Obr. 13.



Obr. 13 Zkoušky creepu.

Vidíme, že rozdíl mezi oběma zkouškami je v poslední části. V této části je rozdíl oproti počátečnímu stavu větší a nelze ho zanedbat.

### 1.1.11 Závěrečné shrnutí

V této kapitole jsme se snažili přiblížit creep z několika různých pohledů. Ukázali jsme přístup využívající aproximaci zkoušek (creepová křivka, Nortonův vztah, životnost atd.). Tento přístup se využívá při technických výpočtech, kdy musíme s creepem počítat. V další části jsme si přiblížili fyzikální příčiny creepu. Tyto jevy jsou různé pro různé materiály (krystalické, amorfni, plasty), mohou se lišit i při různých teplotách, velikosti zrna apod. Krátce zde byl popsán také lom při creepu. V poslední části jsme si ukázali dva možné přístupy k experimentu při creepu. Creep je složitý a komplexní jev, tato kapitola měla ukázat možnosti, jak je možno na tento jev nahlížet. K hlubšímu pochopení je ovšem nutné podrobnější studium. Výpočtům creepu se více věnuje předmět Creep a teplotní namáhání, šíření a vzniku trhlin pak předmět Lomová mechanika atd. Tato kapitola je pouze hrubým přehledem, který Vás v případě zájmu může směřovat do konkrétní oblasti.



## 2 POUŽITA LITERATURA

- [1] Čadek, Josef, Creep kovových materiálů, Academia, 1984.
- [2] Sedláček, Vladimír a kol. Zotavení a rekrystalizace, Academia, 1985
- [3] Dowling, E. Norman. Mechanical Behavior of Material, Pearson, 2007
- [4] Trebuňa F., Šimčák F. Odolnosť prvkov mechanických sústav, Edícia vedeckej a odbornej literatury – Technická universita v Košiciach, 2004
- [5] Výukové materiály k předmětu „Pružnost a pevnost v Energetice“:  
<http://www.339.vsb.cz/PPE.htm>

