



1) Úvod

Doposud jsme se zabývali mechanickými vlastnostmi konstrukčních materiálů za normální teploty. Některé konstrukce – kotle, parní turbíny, tryskové a raketové motory, nukleární reaktory, tlakové nádoby a pod. – pracují za vyšších teplot. U materiálů pro tyto konstrukce jsou rozhodující mechanické vlastnosti ne za normálních, ale za zvýšených teplot. Vezměme si normu ČSN EN 10 028 – ploché výrobky z oceli pro tlakové nádoby a zařízení. V části 2 této normy jsou uvedeny nelegované a legované oceli jež se používají pro vyšší teploty.

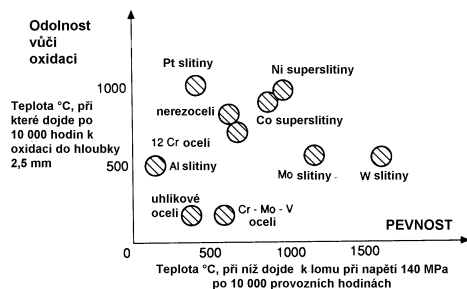
Značka oceli	Materiálové číslo	Značka ČSN
P235GH	1.0345	11 368
P265GH	1.0425	11 418
P295GH	1.0481	13 030
P355GH	1.0473	-
16Mo3	1.5415	15 020
13CrMo4-5	1.7335	15 121
10CrMo9-10	1.7380	15 313

U těchto ocelí jsou normovány nejen hodnoty $R_{p0,2}$ za vyšších teplot (nelegované oceli do 400 °C a legované do 500°C), ale i hodnoty meze tečení 1% a meze pevnosti při tečení v tahu pro různé doby (10 až 200).10³ hodin. To znamená, že s rostoucí teplotou zatížení součásti vyvolává deformaci, která je časově závislá. Takovouto deformaci označujeme termínem

creep nebo také česky tečení. Creepová deformace je pomalá, spojitá deformace probíhající v čase

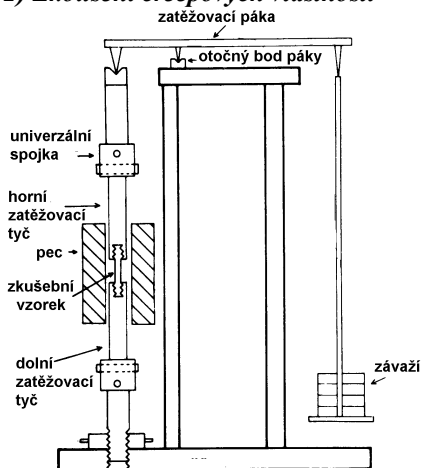
$\varepsilon = f(\sigma, t, T)$ - je funkcí napětí, času a teploty. Naproti tomu u většiny kovů a keramiky za normální teploty deformace nezávisí na čase $\varepsilon = f(\sigma)$. Obecně hovoříme o vysokoteplotních a nízkoteplotních vlastnostech. U kovů a krystalické keramiky má creep vliv na mechanické vlastnosti při teplotách (30 – 60)% absolutní teploty tání (homologická teplota). Ve sklech a polymerech se creepová deformace projevuje při teplotách vyšších než je teplota skelného přechodu T_g – viz přednáška o struktuře.

Při výběru materiálu pro vysokoteplotní aplikace je nutné uvažovat creep. Konstrukční materiály používané pro zařízení pracující při zvýšených teplotách obecně obsahují legující prvky – chrom, nikl, kobalt – obsah těchto poměrně drahých prvků roste s rostoucí odolností materiálu vůči působení teploty. Nové konstrukční keramiky jsou vůči teplotě odolnější než nejdolnější slitiny kovů. Naproti tomu použití polymerů při zvýšených teplotách je omezeno jejich malou odolností vůči zvýšeným teplotám.



Vliv zvýšené teploty se projevuje i na jiné vlastnosti – oxidace, korozní praskání – což je dáno zvýšenou chemickou aktivitou za zvýšených teplot. Např. pro různé materiály je na **obr. 1** uvedena závislost creepových vlastností a oxidace. Přestože o oxidaci nebudeme mluvit je nutné mít na paměti tuto skutečnost při volbě materiálu. Dalším komplexně působícím faktorem je spolupůsobení únavy a creepu. Creep zpravidla způsobí urychlení únavového procesu.

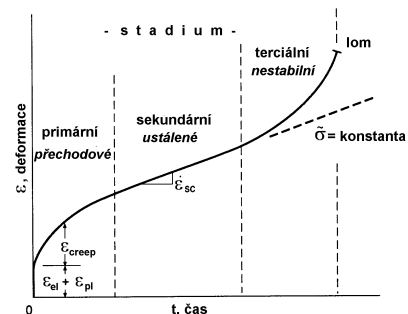
2) Zkoušení creepových vlastností



Z hlediska způsobu zatěžování se zpravidla v souvislosti s creepem používá zatěžování měkké. Nejobecnější způsob zkoušení creepových vlastností je jednoduché pověšení závaží na zkušební tyč - **obr.2**.

Během zkoušky dochází k nárůstu deformace. Zkoušky pro daný materiál se dělají pro různé teploty a napětí, doba trvání zkoušek se může měnit od minut až po několik let.

⇐obr.2 obr.3⇒

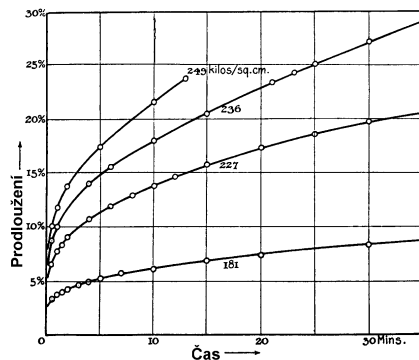


2.1) Vlastnosti pozorované při creepových zkouškách.

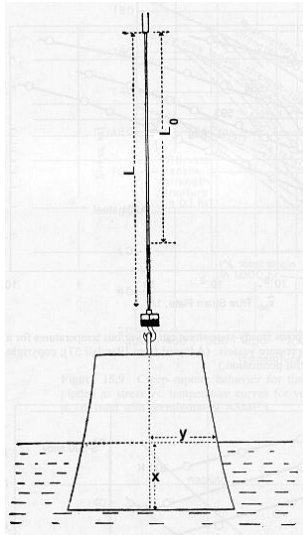
Chování materiálu při creepové zkoušce odpovídá grafu na **obr. 3**. Počáteční stadium elastická + plastická deformace a následná kumulace plastické deformace v důsledku creepu. Rychlost deformace $\dot{\varepsilon}$ daná derivací křivky $\varepsilon - t$ je na začátku zkoušky poměrně vysoká. Dále $\dot{\varepsilon}$ klesá a často se stává konstantní v bodě, který označujeme jako konec primárního stadia. Primární stadium někdy označujeme jako tranzitní nebo přechodové stadium. Druhé stadium - ustálený creep - je charakteristické konstantní hodnotou $\dot{\varepsilon}_{sc}$. Na konci sekundárního



stadia $\dot{\epsilon}$ začíná růst a dochází k nestabilnímu chování, jež vede k lomu. Existují i creepové zkoušky prováděné ne při konstantní síle, ale při konstantním napětí. Na **obr. 4** jsou výsledky takovýchto zkoušek pro olovo - závislosti deformace-čas při různých hodnotách skutečného napětí - převzaté z práce Andradeho, 1910, na **obr.5** je ukázán princip zařízení pro zatěžování při konstantním skutečném napětí. Moderní zkušební stroje mají tento problém řešený speciálním tvarem vačky o kterou se opírá zatěžovací páka. V grafech na **obr.4** není terciální stadium creepu, což je důsledek konstantního skutečného napětí. Poznamenejme, že růst rychlosti deformace v terciální oblasti creepových křivek není způsobeno změnou vlastností materiálu, ale zmenšením průřezu, který je zatížen konstantní silou, což způsobuje nárůst napětí a také nárůst $\dot{\epsilon}$.



Obr.4 – Andradeho výsledky creepových zkoušek olova při konstantním skutečném napětí



Obr. 5

Aparatura používaná Andradem pro creepové zkoušky při konstantním skutečném napětí. Závaží M pověšené na zkušební vzorku je vytvářeno tak,

$$\text{že } y = \frac{1}{L_0 + x} \sqrt{\frac{M \cdot L_0}{\pi \cdot \rho}} \text{ a je ponořeno do}$$

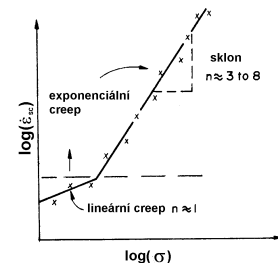
kapaliny o hustotě ρ . V závislosti na prodlužování zkušební vzorku se ponořuje závaží M do kapaliny a klesá působící síla. Tvar závaží zaručuje dosažení konstantního skutečného napětí při rovnoměrné deformaci zkušební vzorku.

2.2) Reprezentativní výsledky creepových zkoušek

Výsledky jednoduchých creepových zkoušek, které použije konstruktér pro výpočty jsou hodnoty – napětí σ , teplota T a některý z údajů rychlost ustáleného creepu $\dot{\epsilon}_{sc}$, doba dosažení předepsaného prodloužení $t_x\%$, příp. doba do lomu t_f . Jak si ukážeme v dalším úvahy o době do lomu při creepu vychází z předpokladu, že nejdelší stadiem je stadium sekundární. Dobu primárního stadia zpravidla zanedbáváme.

Zpracování série experimentálních zkoušek se provádí dvojím způsobem.

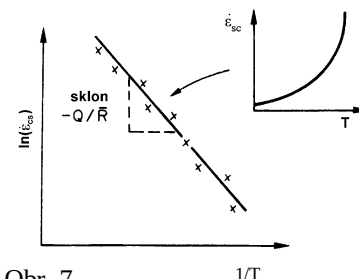
- Vynesení v logaritmické stupnici hodnoty $\dot{\epsilon}_{sc}$ v závislosti na napětí σ pro konstantní teplotu T jak je ukázáno na **obr.6**. Tato závislost má tvar $\dot{\epsilon}_{sc} = B \cdot \sigma^n$, kde n je creepový exponent, jeho hodnoty leží buďto v rozmezí hodnot 3-8, nebo $n \approx 1$. v prvním případě hovoříme o exponenciálním creepu (z hlediska mechanismu se jedná o creep dislokační) a v případě druhém o creep lineární, ke kterému dochází při působení nízkých napětí (z pohledu mechanismu hovoříme o creepu difusním).



Obr.6

- Zvláštní význam má závislost $\dot{\epsilon}_{sc}$ na $\frac{1}{T}$ ($\dot{\epsilon}_{sc}$ se vynášejí v logaritmickém měřítku, T je absolutní teplota a $\frac{1}{T}$ je v měřítku lineárním. Závislost je zpravidla přímková – **obr. 7**. Někdy se veličina $\dot{\epsilon}_{sc}$ nahrazuje dobou do lomu. Tato závislost má tvar

$$\dot{\epsilon}_{sc} = C \cdot e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)}, \text{ kde } R \text{ je univerzální plynová konstanta (8,31 J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}) \text{ a } Q \text{ je aktivační energie creepu, která se uvádí v jednotkách (J.mol}^{-1}). \text{ Poznamenejme, že creepové rychlost roste exponenciálně s rostoucí teplotou.}$$



Obr. 7

Kombinací uvedených dvou závislostí dostaneme konečný výraz pro rychlost stacionárního creepu

$\dot{\epsilon}_{sc} = A \cdot \sigma^n \cdot e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)}$, Hodnoty konstant A , n , a Q jsou materiálové charakteristiky. Rovnice tohoto typu se označuje jako Arrheniova rovnice. Tohoto vztahu se používá všude tam, kde se vyjadřuje rychlost změny v závislosti na teplotě. Tedy se s ní setkáváme v případě popisu rychlosti



creepu, difuze, oxidace, koroze a také např. při popisu rychlosti množení bakterií nebo rychlosti kysání mléka.

3). Fyzikální mechanismy creepu

Obecně lze říci, že mechanismy způsobující creep jsou velice rozdílné pro různé skupiny materiálů. Dokonce i v případě daného materiálu může být mechanismus creepu různý podle toho jaké jsou podmínky zatěžování (teplota, napětí). Pohyb atomů, vakancí, dislokací nebo molekul v pevné fázi vyvolaný tepelnou aktivací je základní příčinou časově závislé deformace tj. creepu. Creepové chování materiálu je podmíněno procesy, které patří do kategorie difuze.

3.1). Viskosní creep

Viskositeta kapalin, jak možná znáte z mechaniky kapalin, je dána poměrem působícího smykového napětí a výsledné rychlosti smykové deformace

$$\eta_{\tau} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}, \quad (1)$$

kde η_{τ} je smyková viskositeta. Podobně je definována tahová viskozita.

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}} \quad (2)$$

Pro ideálně viskosní látku, která je nestlačitelná platí $\eta = 3 \cdot \eta_{\tau}$. Tedy konstantní hodnota η odpovídá chování pístu zatíženého silou. Pohyb pístu je dán vztahem $F = c \cdot \dot{x}$, kde c je konstanta analogická viskozitě η .

Některé pevné látky se chovají podobně jako kapaliny o velmi vysoké viskozitě. Zpravidla se jedná o amorfní látky jako jsou skla a některé polymery. Amorfní pevné látky (skla) vznikají, když je tavenina velmi viskosní právě v okamžiku ztuhnutí, což má za následek, že atomy příp. molekuly nejsou schopny se uspořádat na velkou vzdálenost tj. do krystalové mřížky. Tedy materiály, které jsou normálně krystalické mohou být amorfní při velmi rychlém ochlazení, kdy není dostatek času na krystalizaci.

V případě, že na těleso s amorfní strukturou působí zatížení, molekuly nebo skupiny molekul se vůči sobě pohybují v závislosti na čase a výsledek je creepová deformace. Takovýto pohyb molekul je dán difúzním procesem, který je výraznější s rostoucí teplotou. Růst teploty je v jednoznačném vztahu ke vzrůstu oscilací atomů v okolí rovnovážných poloh. Důsledek větších oscilací je růst pravděpodobnosti, že dojde pod účinkem napětí k přeuspořádání molekul (atomů) a tedy k creepové deformaci. Takovýto mechanismus je označován termínem *tepelná aktivace*. Matematicky se rychlost tepelně aktivovaného procesu popisuje rovnicí (jedná se

opět o známý Arrheniův vztah) tvaru
$$\dot{\epsilon} = A \cdot \frac{Q}{RT}, \quad (3)$$

kde rychlost $\dot{\epsilon}$ je zde rychlost deformace a Q je fyzikální konstanta, kterou nazýváme aktivační energie. Tato energie je mírou potenciálové bariéry, kterou musí překonat atom (molekula), aby změnil(a) svoji polohu. Hodnota Q pro viskosní tečení je konstantou pro daný materiál, ale může se měnit vlivem mechanismu tečení, který závisí na teplotě a působícím napětí.

Rovnice (3) vyjadřuje změnu veličiny η (rov. 2) vlivem teploty. Kombinací rov 2 a 3 dostaneme vztah, který dává do relace rychlost s napětím a teplotou.

$$\dot{\epsilon} = A_1 \cdot \sigma \cdot \frac{Q}{RT}, \quad (4)$$

kde nový koeficient A_1 závisí především na materiálu, ale stejně jako v případě Q se může měnit v případě, že dojde ke změně fyzikální podstaty mechanismu tečení vlivem změny podmínek zatěžování (napětí, teplota). Lineární závislost mezi rychlostí deformace a napětím je hlavním rysem creepu způsobeným viskosním tečením.

3.2.) Creep polymerů

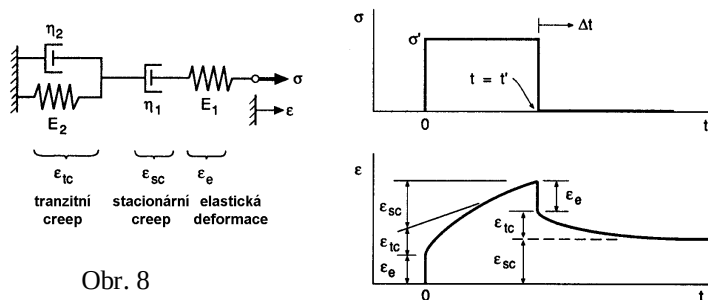
Použití polymerů jako konstrukčních materiálů je omezeno právě creepovými vlastnostmi.

Při teplotách pod teplotou skelného přechodu T_g daného polymeru se prakticky creep nevyskytuje a většinou jsou tyto materiály křehké (gumová hadice při teplotě kapalného dusíku). Nad teplotou T_g se creepové efekty stávají významné. Teplota T_g obecně u polymerů leží v rozmezí teplot $(-100 \sim +200)^{\circ}\text{C}$ a tedy u řady materiálů je hodnota T_g blízká pokojové teplotě. Zejména krystalické termoplasty, tak jako je např. polyetylen, jsou náchylné k viskosnímu tečení při teplotách výrazně nad T_g , zvláště v blízkosti teploty tání. Poznamenejme, že sekundární (vodíkový můstek, Van der Waalsova vazba) vazby, kterými drží řetězcové molekuly navzájem, působí při teplotách nižších než T_g a jsou slabé nad T_g . Tudiž creep může nastat vzájemným klouzáním molekul ve tvaru řetězců a to, viskosním mechanismem. Klouzání je snazší v lineárních polymerech v případě, že řetězce jsou krátké, a tedy nejsou zde překážky znesnadňující klouzání tj. rozvětvení, případně zesítnění molekul. Závislost na teplotě a napětí v případě tohoto typu viskosního tečení je v hrubých rysech popsána vztahem (4).

Nicméně mechanické chování polymerů je mnohem komplikovanější v případě středních teplot (nepatně vyšších než je T_g), kdy hovoříme o strukturním stavu kaučukovitém resp. kožovitém. Zde, klouzání molekulových řetězců je obtížnější zvláště když jsou molekuly dlouhé a jsou vzájemně propleteny. Propletení dlouhých molekul má za následek, že roste během deformace odpor materiálu vůči deformaci (rozplétání drátů elektrického



osvětlení na vánoční stromek). Překážkou ve vzájemném klouzání molekul je nejen jejich délka, ale i tvar – větvení, zesítnění. Dalším efektem, který překážky způsobují je „tvarová paměť materiálu“ – těleso si pamatuje jaký mělo tvar před deformací. To znamená, že při odlehčení napnuté a zkroucené segmenty řetězců mezi body propletení nebo zesítnění působí podobně jako pružiny a dochází v závislosti na čase k částečnému odbourání počáteční creepové deformace a tedy k regeneraci. Tyto vlastnosti – zpomalování creepu, regenerace – se poněkud liší od jednoduchého viskosního chování. Pro výklad se v učebnicích o plastech zavádí rheologické modely. Při deformaci polymerů se vyskytuje elastická deformace a viskosní deformace, která má dvě části – nevratnou část a část vratnou. Jednoduchý rheologický model, který aproximuje chování polymerů je uveden na **obr.8**



Obr. 8

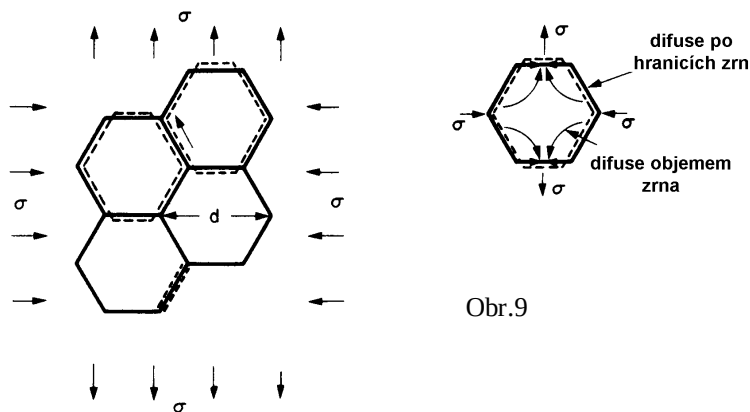
3.2.1 Použití polymeru jako konstrukčního materiálu

Teplota skelného přechodu T_g polymerů vzrůstá se stupněm zesítnění. Velmi zesítněné polymery (reaktoplasty např. epoxi) jsou mnohem více odolné creepu při pokojové teplotě ve srovnání např. s polyetylenem. Viskozita polymeru nad T_g roste s molekulární vahou (délkou molekul), tedy rychlost creepu polymeru klesá s rostoucí molekulovou vahou. Poslední z vlivů na creep je krystalinita plastu; krystalický příp. částečně krystalický polymer je odolnější vůči creepu ve srovnání s plastem s amorfni strukturou.

Podstatné snížení náchylnosti polymeru vůči creepu se docílí vytvořením kompozitu, t.j. plněním plastové matrice skleněným nebo křemeným prachem (plněný polypropylen se používá na řadu součástek v automobilu). Nejodolnějším materiálem vůči creepu je kompozit plastová matrice + dlouhá vlákna (GFRP, CFRP), v tomto případě zatížení přenáší vlákna, která jsou velice pevná a zcela odolná vůči creepu.

3.3 Difusní tečení v krystalických materiálech

Konstrukční materiály s krystalickou strukturou jsou kovy, jejich slitiny a keramika. V případě keramiky může struktura obsahovat vedle krystalické fáze i fázi skelnou jako je tomu např. u porcelánu. Rozdíl mezi krystalem a sklem je pouze v uspořádání atomů na větší vzdálenost. Základní strukturní jednotkou je atom, na rozdíl od polymerů, kde základní strukturní jednotkou je dlouhá molekula (řetězec).



Obr.9

Základem creepových procesů v krystalech a sklech je tedy difuze atomů. Plastická deformace při creepu je důsledkem součinnosti dvou mechanismů -difusní tečení, dislokační tečení. Difusní tečení vzniká při nízkých napětích, ale vyžaduje poměrně vysokou teplotu. Hranice mezi krystalovými zrny jsou neuspořádané oblasti, ze kterých mohou vakance difundovat do krystalové mřížky zrna. V zatíženém tělese v okolí hranic zrn, které jsou orientovány kolmo k tahovému napětí dochází k tahové deformaci a v okolí hranic rovnoběžných s napětím k deformaci tlakové. V místech tahové deformace vznikají vakance a v místech tlakové deformace intersticiální atomy. Difusi se pak koncentrace bodových poruch vyrovnávají a tak ve směru tahového napětí se zrna prodlužují – transport materiálu trvalá creepová deformace.

Dochází-li k difuzi vakancí krystalovou mřížkou, pak hovoříme o Nabarrově Herringově creepu. Pro tento mechanismus je charakteristická závislost rychlosti creepu

$$\dot{\epsilon} \propto \frac{\sigma}{d^2}, \text{ kde } d \text{ je průměr zrna.} \quad (5)$$

V případě difuze atomů podél hranic zrn, pak hovoříme o Cobleho creepu.

$$\dot{\epsilon} \propto \frac{\sigma}{d^3}. \quad (6)$$



Přímá úměra mezi $\dot{\epsilon}$ a napětím σ vyjadřuje, že oba mechanismy difusního tečení jsou viskosní povahy. Protože viskosní proces je tepelně aktivovaným procesem, platí pro něj závislost typu rov. 4. Podrobnější rozbor a zvláště srovnání s experimentálními výsledky vedl k závěru, že v konečném vztahu je nutné zahrnout i teplotu, takže výsledné rovnice mají tvar:

$$\dot{\epsilon} = \frac{A_2 \sigma}{d^2 T} \exp\left(-\frac{Q_v}{R \cdot T}\right) \quad \text{v případě Nabarrova Herringova creepu, (7)}$$

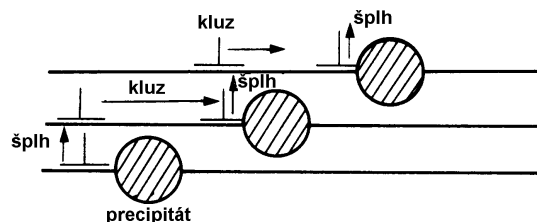
$$\dot{\epsilon} = \frac{A'_2 \sigma}{d^3 T} \exp\left(-\frac{Q_b}{R \cdot T}\right) \quad \text{v případě Cobleho creepu. (8)}$$

kde A_2 a A'_2 jsou materiálové charakteristiky. Hodnoty Q_v a Q_b jsou aktivační energie samodifuze v mřížce a po hranici zrna.

3.4. Dislokační creep.

Víme, že plastická deformace materiálů s krystalovou mřížkou je podmíněna pohybem dislokací. Napětí pro pohyb dislokací musí a) překonat odpor krystalové mřížky - třecí napětí; b) překonat překážky vyvolané distorsí krystalové mřížky - atomy v tuhém roztoku, precipitáty, síťové dislokace a pod. Difuze atomů může vyvolat uvolnění dislokací a tak usnadnit plastickou deformaci - dislokační creep.

Jak k tomuto uvolňování dislokací dochází? Ukažme si případ dislokace, která se zastavila o precipitát (obr.10). Síla, která působí na dislokaci ve skluzové rovině je v rovnováze s reakční silou od precipitátu. Pokud skluzová rovina neprochází středem precipitátu (což je nejčastější případ), potom se zde objevuje složka síly, která se snaží vytlačit dislokaci z její skluzové roviny. Dislokace se nemůže tímto směrem pohybovat přemísťováním atomů ve skluzové rovině, ale může k jejímu pohybu dojít tímto směrem v případě, že atomy, které tvoří hranu vložené poloroviny oddifundují.. Tento proces se nazývá „climb (šplh)“ dislokací a protože je podmíněn difusí dochází k němu za teplot vyšších než $0,3T_M$. Za teplot $(0,3 - 0,5) \cdot T_M$ je dominantní difuze jádry dislokací, a při teplotách vyšších se jedná o objemovou difusi.

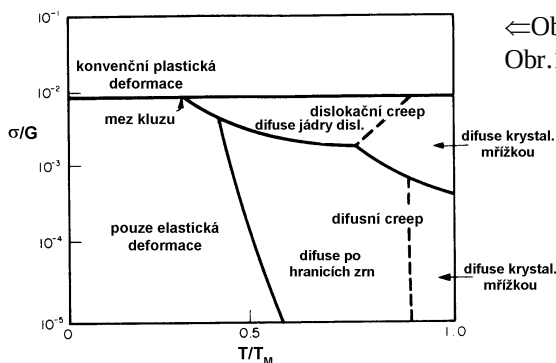


Obr.10

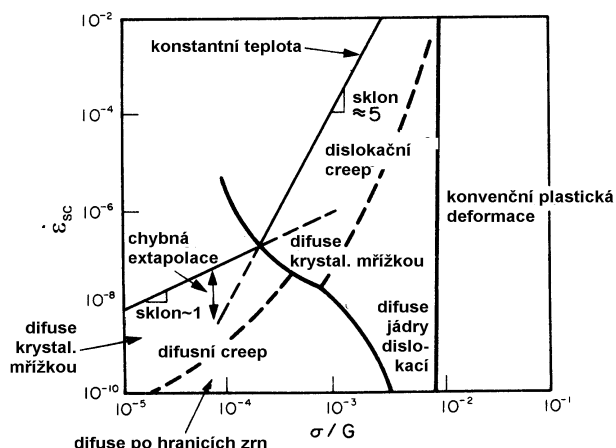
Dislokační creep je opět ovládan difusními procesy a tedy zde bude hrát roli Arrheniova rovnice. Dále se zde objevuje, podobně jako v případě difusního creepu závislost rychlosti na $1/T$. Z hlediska struktury v případě dislokačního creepu nehrají roli hranice zrna, ale je zde výrazná závislost na napětí. Vztah vyjadřující rychlost

dislokačního creepu má tvar
$$\dot{\epsilon} = \frac{A_3 \sigma^m}{T} e^{\frac{-Q}{RT}} \quad (9)$$

3.5 Diagramy deformačních map.



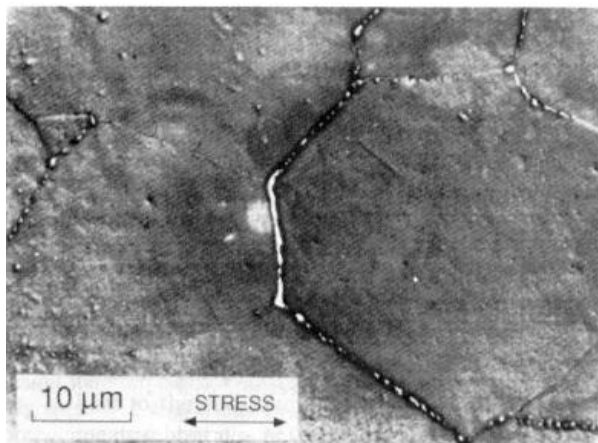
←Obr.11
Obr.12⇒



Vzájemné soupeření mezi různými deformačními mechanismy v případě jednoho materiálu se zpracovává ve formě tzv. deformačních map - obr. 11 a 12. V těchto mapách jsou vyznačeny oblasti napětí a teploty (obr. 11) nebo rychlosti stacionárního creepu a napětí (obr. 12), ve kterých probíhá určitý mechanismus creepové deformace (je zde také vyznačena oblast, kde dochází k plastické deformaci a kde je pouze deformace elastická). Diagramy tohoto typu byly experimentálně proměřeny pro řadu technických materiálů (kovů i keramiky) a slouží jako podklady pro volbu materiálu pro součásti jež pracují za zvýšených teplot.



4) Parametry ekvivalence teploty – času, odhad života součásti při deformaci creepem



Creepová deformace může dosáhnout okamžiku porušení materiálu a to rozvojem trhlin, křejů nebo jiného porušení, které je důsledkem intenzivní plastické deformace. Např. v krystalických materiálech se dutiny mohou objevit podél hranic zrn, nebo v jiných místech lokalizace koncentrace napětí jako jsou např. precipitáty a to mechanismem označovaným jako creepová kavitace. Příklad je na obr. 13. Pokluzy po hranicích zrn nebo jiná tvorba dutin, která vede s pokračující deformací k jejich propojování (koalescenci) až dojde k lomu – lom při creepu (creep rupture). Nicméně, je-li teplota dostatečně vysoká v případě čistých tvárných kovů, pak může dojít k dynamické rekrytalizaci, při níž dochází k odstranění dutin prakticky v okamžiku

jejich vzniku. Tak dochází ke vzniku velkých deformací a lomu předchází vznik velmi ostrého krčku. Lom při creepu houževnatých polymerů je také charakteristický velkou rovnoměrnou deformací nebo intenzivní lokální deformací (krček).

V případě návrhu součásti zařízení, kde musí být uvažován creep je projektovaná doba života zařízení 20 a více let. Laboratorní zkoušky jsou časově značně omezené zpravidla 1 000 hodin (42 dní) nebo někdy 10 000 hodin (14 měsíců), velice zřídka se dělají zkoušky 100 000 hod (11 let). Pro odhad vlastností materiálu při velice malých rychlostech deformace a dlouhém čase je jeden z možných přístupů odhadnout deformace při creepu při provozní teplotě pomocí extrapolace vhodné křivky σ versus $\dot{\epsilon}$ směrem k nízkým hodnotám $\dot{\epsilon}$. Podobně dobu do lomu, nebo dobu vzniku určité deformace můžeme odhadnout extrapolací závislosti napětí – doba života. Nicméně takováto extrapolace nemusí být správná a to v případech, že sklony přímek proložené experimentálními body v log-normálních nebo log-log souřadnicích závislosti $\sigma \sim \dot{\epsilon}$ nebo $\sigma \sim t_r$ nemusí být konstantní, nebo jsou konstantní, ale pouze v omezeném intervalu proměnných. Náhlá změna sklonu může nastat změnou mechanismu creepu a v tom případě extrapolace není možná. Jinými slovy řečeno aproximací není možné provádět přes hranice různých creepových mechanismů v deformačních mapách – obr. 12.

Mnohem úspěšnější přístup je použití dat z relativně krátkodobých zkoušek, ale provedených při teplotách vyšších než je teplota provozní, k predikci chování materiálu při delších dobách při provozní teplotě. V tomto případě je mnohem pravděpodobnější stejný fyzikální mechanismus creepu při zkoušce a provozních podmínkách, než v případě extrapolace při konstantní teplotě. Přístup je založen na použití parametru vyjadřujícího ekvivalenci teploty a času (pozn. anglický termín time-temperature parametr). V podstatě existují tři přístupy tohoto typu označované jako parametr

- Sherbyův a Dornův
- Larsonův a Millerův
- Mansonův a Haferdův.

4.1) Parametr Sherbyův Dornův (S-D)

Základem S-D parametru je Arrheniův vztah. Vycházíme z předpokladu, že aktivační energie creepu je konstanta. Napišme rovnici (3) v diferenciální formě

$$d\epsilon = A(\sigma)e^{\frac{-Q}{R.T}} dt. \quad (10)$$

Víme, že parametr $A(\sigma)$ je funkcí pouze napětí, nezávisí ani na teplotě, ani na napětí. Po integraci rov. (10), jestliže zanedbáme integrační konstantu, dostaneme vztah

$$\epsilon_{sc} = A(\sigma)t.e^{\frac{-Q}{R.T}}. \quad (11)$$

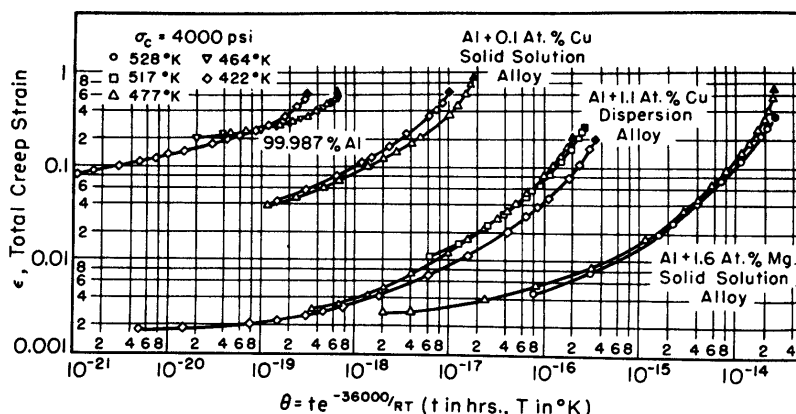
Index $_{sc}$ vyjadřuje skutečnost, že velikost creepové deformace je dána pouze velikostí deformace vzniklé během stacionárního creepu (počáteční, primární stadium jsme vypustili tím, že jsme vypustili integrační konstantu). Na základě rov. 11 můžeme říci, že hodnota deformace ϵ_{sc} v případě konstantního napětí je jednoznačnou funkcí

veličiny, kterou označíme $\theta = t.e^{\frac{-Q}{R.T}}$. Veličina θ je funkcí teploty a času. Určitá hodnota θ_i (a tedy i hodnota creepové deformace při určitém napětí) odpovídá různým dvojicím teploty a času v případě, že mezi těmito dvojicemi platí vztah

$$\theta_i = t_1.e^{\frac{-Q}{R.T_1}} = \dots = t_n.e^{\frac{-Q}{R.T_n}}. \quad (12)$$



Pro ilustraci jsou na **obr. 12** uvedeny experimentálně získané závislosti creepové deformace vs. veličina θ pro hliník a různé slitiny hliníku zjištěné při napětí $\sigma_c = 27,6$ MPa (na obr. 12 jsou použity jednotky napětí psi) při různých teplotách.



Obr. 12

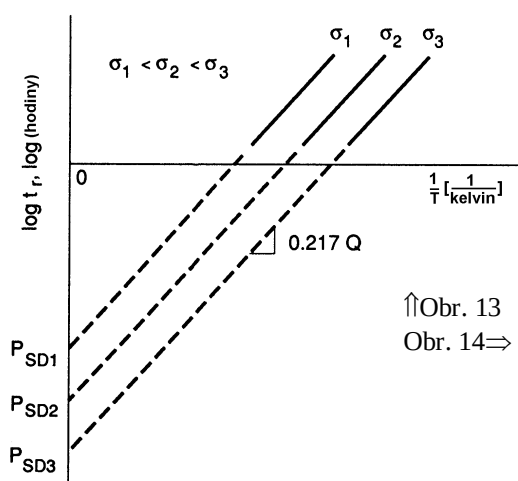
Předcházející úvaha tvoří základ v praxi používaných parametrů pro vyjádření ekvivalence času a teploty, které mají označení S-D parametr a L-M parametr.

K formální definici S-D parametru použijeme následující logiku. Jak plyne z výsledků na obr. 12, hodnota θ závisí pouze na napětí. Jestliže rov. 12 zlogaritmujeme a uvažujeme podmínky lomu $\theta = \theta_r$, čas $t = t_r$ (index r se používá proto, že anglický

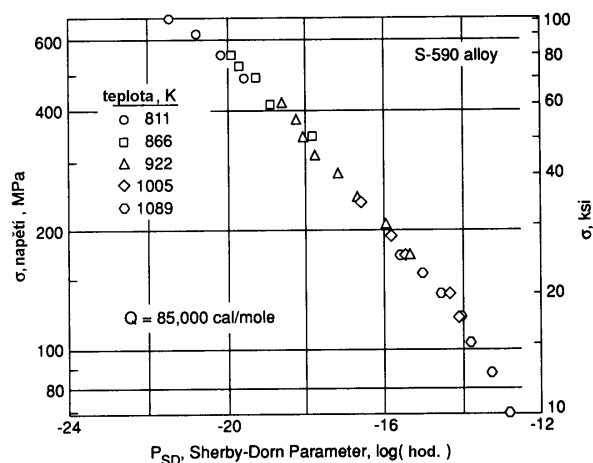
výraz pro lom při creepu je creep rupture) dostaneme výraz

$$P_{SD} = \log \theta_r = \log t_r - 0,217 \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{T} \right), \quad (13)$$

kde P_{SD} je S-D parametr, číselná hodnota 0,217 je z konstant $\log_{10}(e)$ a R . Čas je zde uvažován v hodinách, konstanta $R \sim 2$ cal/(K.mol) a teplota ve stupních Kelvina.



Obr. 13
Obr. 14



Aktivační energii pro použití S-D parametru zjistíme vynesemím doby do lomu v souřadnicích $\log(t_r)$ versus

$1/T$, jak je ukázáno na **obr. 13**. Na obr. 13 je svazek rovnoběžných přímek, každá přímka odpovídá jisté hodnotě napětí. Sklony těchto přímek jsou rovny hodnotě $0,217 Q$ a každá hodnota daná průsečíkem této přímky v bodě $1/T = 0$ představuje hodnotu parametru P_{SD} pro danou hodnotu napětí. Proto k výpočtu hodnot Q a P_{SD} potřebujeme znát alespoň 2 body přímky pro konstantní napětí. Charakteristické hodnoty aktivační energie Q jsou 90 000 cal/mol pro oceli i korozivzdorné oceli, 36 000 cal/mol pro hliník a jeho slitiny. Další hodnoty jak Q vybraných materiálů jsou v tab. 1.

Tabulka 1 – Některé hodnoty konstant pro parametry vyjadřující ekvivalenci času a teploty (hodnoty jsou uvedeny pro teplotu v stupních Kelvina a dobu do lomu t_r v hodinách)

Material	Sherby- Dorn	Larson – Miller	Manson – Haferd	
	Q, cal/mole	C	T_a , K	$\log(t_a)$
Různé oceli i korozivzdorné	$\approx 90\,000$	≈ 20	-	-
Hliník a jeho slitiny	$\approx 36\,000$	-	-	-
S-590(Fe báze)	85 000	17	172	20
A-286 korozivzdorná ocel	91 000	20	367	16
Nimonic 80A (Ni báze)	91 000	18	311	16
1Cr-1Mo-0,25V ocel	110 000	22	311	18



V případě, že je známá hodnota Q pak údaje napětí versus doba provozu mohou být získána ze závislosti uvedené na obr. 14. Na obr. 14 je pro žárovečnou slitinu S-590 vynesena závislost napětí – P_{SD} . Vidíme, že body pro různá napětí a teploty leží na jediné závislosti. Tedy je možné na základě krátkodobých zkoušek při vyšších teplotách vytvořit závislosti P_{SD} – σ předpovídat dlouhou dobu do lomu pro nižší teploty.

Příklad 1

Součást vyrobená z legované oceli je v provozu za zvýšené teploty vystavena tahovému napětí 150 MPa. Jaká je nejvyšší teplota, které může být součást vystavena, jestliže komponenta má být funkční 40 dní. Při výpočtu uvažujeme bezpečnostní faktor 10. V laboratoru byla provedena zkouška materiálu, ze kterého je vyrobena komponenta. K lomu zkušebního tělesa došlo po 260 hodinách při působení napětí 150 MPa při teplotě 530°C.

Řešení

Protože napětí je při zkoušce i při provozu stejné použijeme hodnot ze zkoušky k výpočtu Sherbyho Dornova parametru dosazením do rov. 13. Tento parametr pak použijeme k predikci provozních podmínek.

$$P_{SD} = \log(t_r) - \frac{0,217 \cdot Q}{T} = \log(260 \text{ hod}) - \frac{0,217 \cdot (90000) \cdot K}{(530 + 273) K} = -21,91$$

Při výpočtu jsme použili následující jednotky, člen $0,217 \cdot Q$ je ve stupních Kelvina v případě, že Q je cal/mol, dále teplota zkoušky zadaná ve °C je přepočtena na stupně K. Hodnotu Q jsme použili z tab. 1.

Pro dobu provozu 40 dní a při koeficientu bezpečnosti 10 musí součást ve skutečnosti vydržet v provozu 400 dní, tj. $t_r = 9600$ hodin. Z rovnice 14 vypočteme hledanou nejvyšší provozní teplotu.

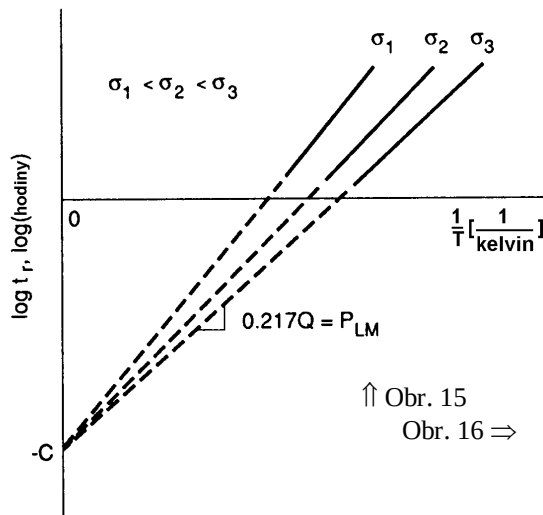
$$T = \frac{0,217 \cdot Q}{\log(t_r) - P_{SD}} = \frac{0,217 \cdot (90000)}{\log(9600 \text{ hod}) - (-21,91)} = 754 K = 481^\circ C$$

4.2 Larsonův Millerův (L-M) parametr

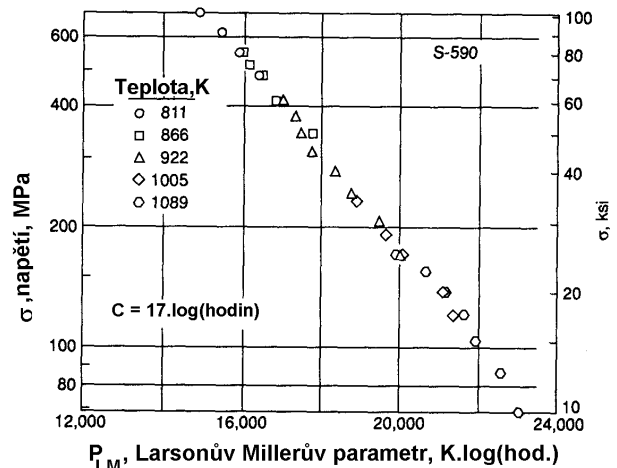
Parametr ekvivalence teploty a času označovaný jako Larsonův a Millerův je odvozen analogickým způsobem jako parametr Sherbyho a Dorna, ale za trochu jiných předpokladů, které vedou na jinou rovnici. Odvození L-M parametru je také založeno na rov. 12, kde za $\theta = \theta_r$ a $t = t_r$ pro dobu do lomu a opět logaritmujeme obě strany rovnice. Po úpravě dostáváme $P_{LM} = 0,217 \cdot Q = T(\log(t_r) + C)$,

(14)

kde $C = -\log(\theta_r)$, jednotky jsou zde stupně K pro teplotu T a hodiny pro dobu do lomu t_r .



Hodnotu C můžeme interpretovat jako extrapolovaný



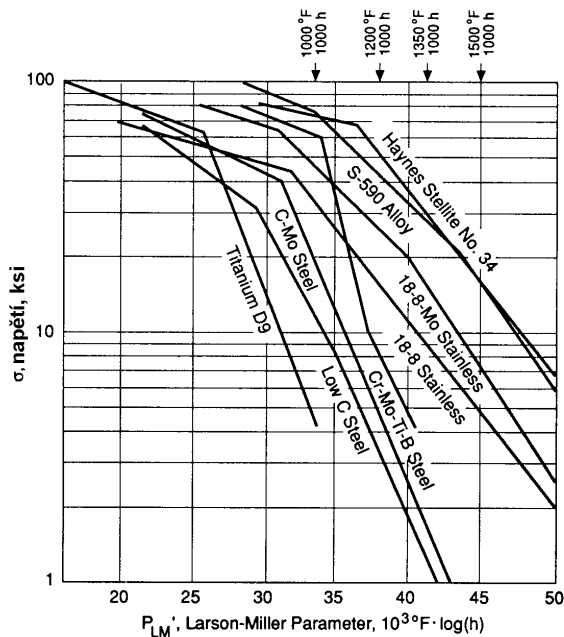
průsečík v závislosti $\log(t_r)$ versus $1/T$ uvedené

schematicky na obr. 15. Opět dostáváme pro danou hodnotu napětí přímku, ale přímky pro jednotlivá napětí se protínají při $1/T = 0$ při $\log(t_r) = -C$. Směrnice přímek vyjadřují hodnoty P_{LM} , které odpovídají určitým hodnotám napětí. K výpočtu hodnot C a P_{LM} potřebujeme znát alespoň dva body ležící na přímce. Poznamenejme, že tento přístup má stejný teoretický základ jako S-D parametr, rozdíl je pouze v závislosti aktivační energie na napětí. V případě S-D parametru se aktivační energie s napětím nemění, kdežto v případě L-M parametru předpokládáme závislost aktivační energie na napětí. V druhém případě předpokládáme, že θ_r se nemění s napětím a je materiálovou charakteristikou, která je dána hodnotou C .

V případě, že je známá hodnota C , pak mohou být určeny hodnoty parametru P_{LM} na základě závislosti napětí – doba do lomu (obr. 16). Hodnota C pro doby do lomu různých ocelí i jiných kovových materiálů je často blízká



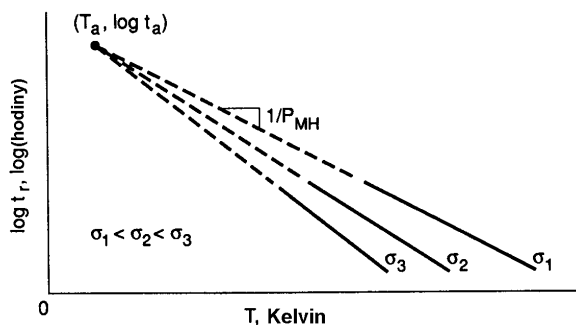
hodnotě 20. Proto se tato hodnota používá k odhadu doby do lomu pro materiály, o nichž nejsou materiálové charakteristiky k dispozici.



↑ Obr. 17

↓ Obr. 18

4.3 Mansonův Haferdův parametr.



v tabulce.1. V případě, že hodnoty T_a a $\log(t_a)$ jsou známy, pak parametr P_{MH} se používá stejně jako výše uvedené parametry. Příklad závislosti P_{MH} je na obr. 19. ⇒

4.4 Diskuse

Diskutované parametry ekvivalence teploty a času se jeví navzájem rozdílné a nekonzistentní s obecnými rovnicemi creepu – rov. 7,8,9. Přesto tyto parametry dávají často rozumné výsledky. Jako příklad slouží obr. 14, 16 a 19, kde je zpracován jeden a tentýž soubor dat třemi různými způsoby a vidíme, že ve všech třech případech s dobrou věrohodností.

Úspěch každého přístupu na základě parametru ekvivalence teploty a času závisí na podobnosti fyzikálního mechanismu creepu probíhajícího jak při laboratorních zkouškách (relativně krátké časy a vysoké teploty) tak i při provozních podmínkách (dlouhé doby a nižší teploty). Zpravidla se používá empirické pravidlo, že zkoušky mají mít dobu trvání ne kratší než 10 % požadované provozní doby. Např. pro projektovanou životnost 20 let jsou požadovány zkoušky alespoň 17500 hodin (t. j. 2 roky).

LM parametr, podobně jako SD parametr, se také může použít k odhadu doby dosažení jisté hodnoty plastické deformace $\epsilon_x\%$, který odpovídá času dosažení $x\%$ deformace při daném napětí. Další použití LM parametru příp. i jiných parametrů ekvivalence teploty a času je srovnání resp. seřazení materiálu z hlediska odolnosti vůči creepu. Takovéto srovnání je na obr. 17. Čím je křivka posunuta výš vpravo, tím je materiál odolnější vůči creepu.

Příklad 2.

Zadání je stejné jako v příkladě 1, ale odhad provedeme pomocí LM parametru.

Řešení.

Nejprve vypočteme hodnotu P_{LM} z hodnot uváděných pro laboratorní zkoušku.

$$P_{LM} = T(\log(t_r) + C) = [(530 + 273)K][\log(260 \text{ hod.}) + 20] = 18000$$

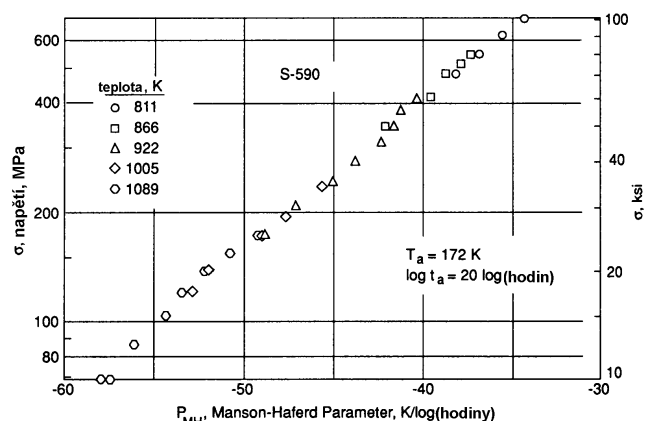
Nyní budeme řešit rovnici (15) pro teplotu T při dosažení $t_r = 9600$ hod a vypočtené hodnoty P_{LM}

$$T = \frac{P_{LM}}{\log(t_r) + C} = \frac{1800}{\log(9600) + 20} = 715K = 478^\circ C.$$

Tento parametr je založen na empirickém poznatku, že závislost $\log(t_r)$ vs $1/T$ je v řadě případů $\log(t_r)$ vs T a tedy tvoří přímku pro konstantní napětí. Pak dostáváme svazek přímek, které se protínají v bodě $[T_a, \log(t_a)]$ jak schematicky ukazuje obr. 18. Obě hodnoty T_a a $\log(t_a)$ jsou považovány za materiálové charakteristiky. Pro danou hodnotu napětí je MH parametr dán jako převrácená hodnota směrnice dané přímky

$$P_{MH} = \frac{T - T_a}{\log(t_r) - \log(t_a)}. \quad (15)$$

Několik hodnot konstant T_a a $\log(t_a)$ je uvedeno





5. Volba kovových materiálů resp. konstrukční keramiky které jsou odolné vůči dislokačnímu creepu.

Základní kritéria pro volbu, resp. vývoj konstrukčních materiálů pro provozní podmínky, kde se může uplatnit dislokační creep jsou

- Vybrat materiál s vysokým bodem tavení, poněvadž difuze (a tedy i rychlost creepu) je tím rychlejší, čím je provozní teplota T blíže k teplotě tání T_m .
- Maximalizovat překážky pohybu dislokací vytvářením slitin, u kterých dochází k substitučnímu i precipitačnímu zpevnění, precipitáty musí být při provozní teplotě stabilní.
- Vybrat, je-li to možné, krystalický materiál s velkým odporem vůči pohybu dislokací jako jsou materiály s kovalentní vazbou (což splňují např. oxidy, silikáty, karbid křemíku, nitrid křemíku a kompozity na bázi těchto materiálů).

V současné době používané materiály řadu těchto kritérií splňují. Seřadíme je z hlediska teploty tavení:

RR58: Hliníková slitina, která vykazuje jak zpevnění tuhého roztoku, tak i precipitační zpevnění; slitina má nízkou teplotu tavení a tedy se hodí pouze pro teploty do 150°C , její výhodou je nízká hmotnost.

Vysokolegované slitiny typu 304, 316, 321 korozivzdorné oceli, železo obsahující jednak substituční prvky (hlavně Ni a Cr) a precipitáty (karbidy a intermetalika), vhodné do 600°C

Nízkolegované feritické oceli, železo obsahující do 4% Cr, Mo a V, jejich creepová odolnost je dána přítomností precipitátů, vhodné do 650°C .

Niklové superslitiny, velká skupina niklových slitin, kde zpevnění je dáno jednak zpevněním tuhého roztoku přítomností hlavně Cr, W, Co a jednak přítomností precipitátů (karbidy a intermetalika), vhodné do teplot 950°C

Žáruvzdorné oxidy a karbidy, známý korund – Al_2O_3 ; skelná keramika na bázi SiO_2 ; karbid křemíku SiC ; nitrid křemíku Si_3N_4 ; dále sialony – slitiny Si_3N_4 a Al_2O_3 ; potenciálně použitelné až do teplot 1300°C

Základní kritéria pro volbu, resp. vývoj konstrukčních materiálů pro provozní podmínky, kde se může uplatnit difusní creep .

Difusní creep je významný u materiálů které mají jemné zrna (to je i v případě konstrukční keramiky) a které se používají při vysokých teplotách a pro nízká zatížení. Pravidla pro volbu a vývoj materiálu jsou:

- Vybrat materiál s vysokým bodem tavení,
- Připravit materiál s hrubým zrnem, zvětší se difusní vzdálenost – nejlepší je použití monokrystalu ,
- Připravit materiál s precipitáty na hranicích zrn a tak bránit pokluzům po hranicích zrn.

Kovové slitiny jsou zpravidla uzpůsobeny z hlediska odolnosti vůči dislokačnímu creepu, difusní tečení je uvažováno zřídka. Významnou výjimkou je technika tzv. směrového tuhnutí, při které se získávají velice velká zrna, která jsou protažena ve směru předpokládaného působícího napětí. Naproti tomu keramiky ty se deformují především mechanismem difusního creepu.