

Creep a creepu odolné oceli

Použití creepově odolných ocelí. Mechanismus creepu. Zkoušení citlivosti na creep. Tlumení křehnutí, typy creepu/teplotě odolných ocelí ISO/TR 15608, skupiny 4,5 a 6.



doc. Ing. Jaromír MORAVEC, Ph.D.

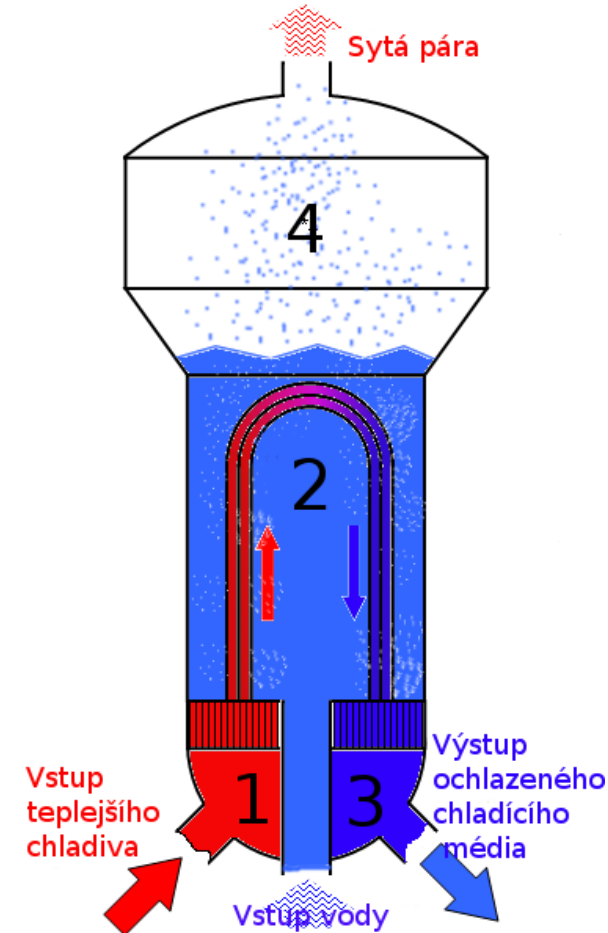
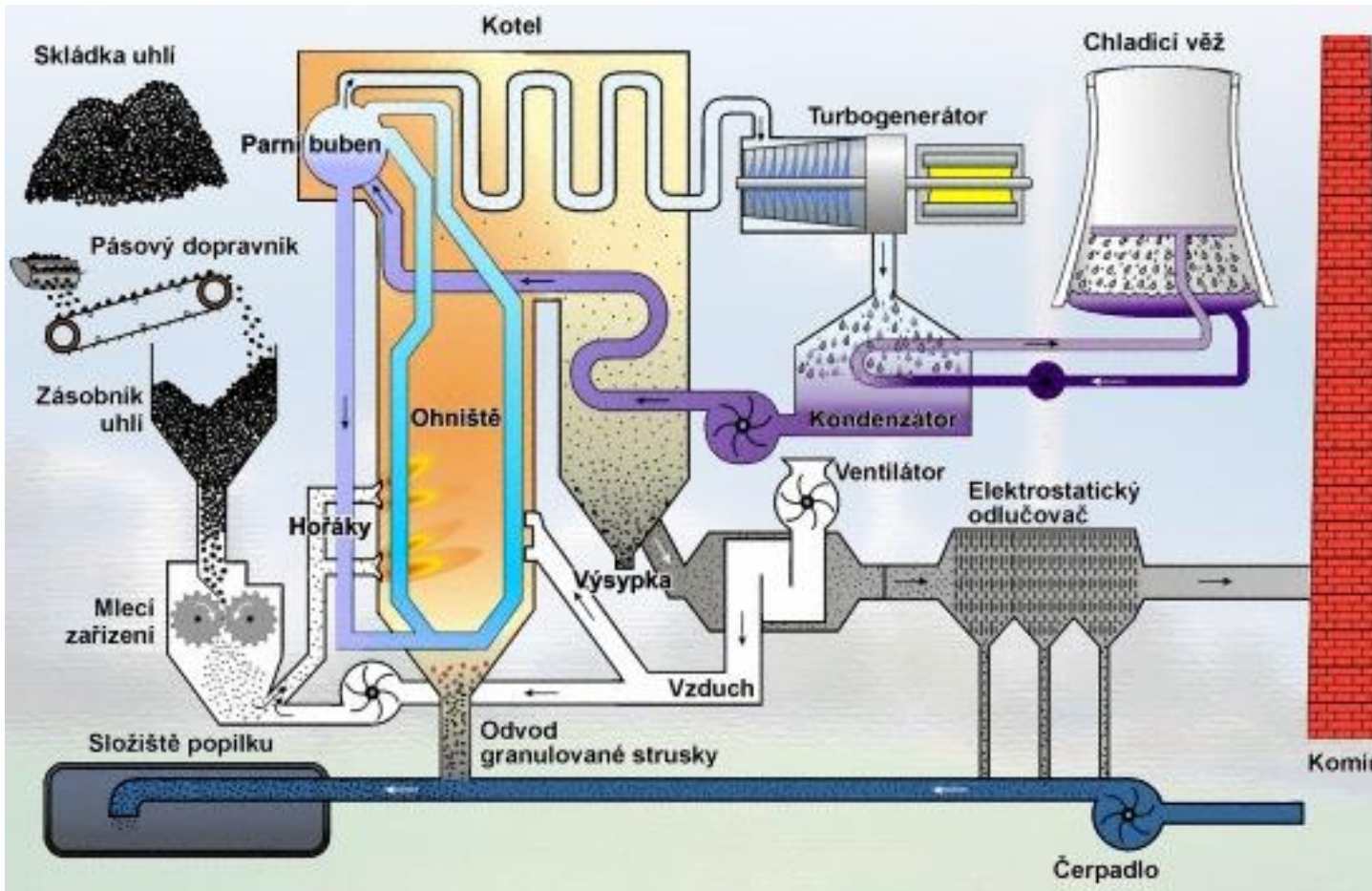
Žárupevné oceli - použití

Představují širokou skupinu materiálů, které jsou využívány pro práci **za zvýšených a vysokých teplot v tzv. oblasti creepového namáhání**. Jedná se o řadu strojních součástí zejména z oblasti energetiky (přehříváková a parovodní potrubí, kotle, výměníky, skříně a rotory parních i spalovacích turbín).

- Energetika je významným odvětvím pro další všestranný rozvoj společnosti.
- I přes nástup různých alternativních zdrojů zůstávají pro výrobu elektrické energie rozhodující tepelné elektrárny spalující fosilní paliva a jaderné elektrárny využívající radioaktivního rozpadu prvků.
- V současné době vyprodukují elektrárny spalující fosilní paliva okolo 40% veškeré světové elektrické energie. Přestože patří mezi intenzivní globální producenty emisí CO₂, předpokládá se pokračování jejich provozu minimálně v dalších 30 až 40 letech.
- Proto každé vylepšení tepelné účinnosti těchto zařízení má vliv nejen na finanční úsporu investora, ale také na životní prostředí. Zvyšování účinnosti je však limitováno vlastnostmi použitých konstrukčních materiálů.

Žárupevné oceli - použití

Představují širokou skupinu materiálů, které jsou využívány pro práci **za zvýšených a vysokých teplot v tzv. oblasti creepového namáhání**. Jedná se o řadu strojních součástí zejména z oblasti energetiky (přehřívací a parovodní potrubí, kotle, výměníky, skříně a rotory parních i spalovacích turbín).



Definice žáruvzdornosti a žárovevnosti

Žáruvzdornost:

Žáruvzdornost je charakterizována jako **schopnost materiálu dlouhodobě odolávat opalu**. Oceli, které jsou schopné v oxidačním prostředí dlouhodobě odolávat za teplot zhruba nad 600 °C, ale nejsou schopné přenášet větší mechanické namáhání, jsou označovány jako žáruvzdorné (dříve i žárovzdorné).

Jde převážně o oceli feritické nebo austenitické, s dobrou odolností proti oxidaci a účinkům horkých plynů a spalin při teplotách vyšších než 550°C. V oxidačním prostředí se vytvoří ochranná vrstva oxidů Cr, Si a Al na povrchu oceli. Tyto oxidy také snižují působení S. V redukční atmosféře, kde se nevytvářejí oxidy, zvýšený obsah Ni snižuje nauhličení i citlivost k působení S.

Žárovevnost:

Žárovevnost můžeme definovat jako schopnost materiálu dlouhodobě odolávat mechanickému namáhání za dané teploty. Měřítkem žárovevnosti je mez tečení či mez pevnosti při tečení. Oceli tohoto typu pracují v oblasti creepového namáhání.

Žárovevné jsou hlavně martenzitické a austenitické oceli s dobrou odolností proti deformaci při dlouhodobém mechanickém namáhání a teplotách nad 500°C.

Žárupevné oceli - použití

Elektrárny na fosilní paliva provozované v současnosti je možné rozdělit podle jejich provozních parametrů na:

- **Podkritické** (sub-critical) provozované při **teplotách do 538°C a tlacích do 16,7 MPa**, s účinností okolo 35%.
- **Superkritické** (SC) provozované při teplotách v rozmezí **540 až 566°C a tlacích do 25 MPa**, s účinností okolo 46%.
- **Ultra-superkritické** (USC) provozované při teplotách v rozmezí **580 až 620°C a tlacích do 28 MPa**, s účinností okolo 50%.

Předpokládané vývojové tendence provozních parametrů uvažují růst teploty až **k 700 °C při provozních tlacích okolo 35 MPa**. Tyto tendence současně předpokládají nástup nových materiálů především na bázi slitin Ni, s účinností přes 50%.

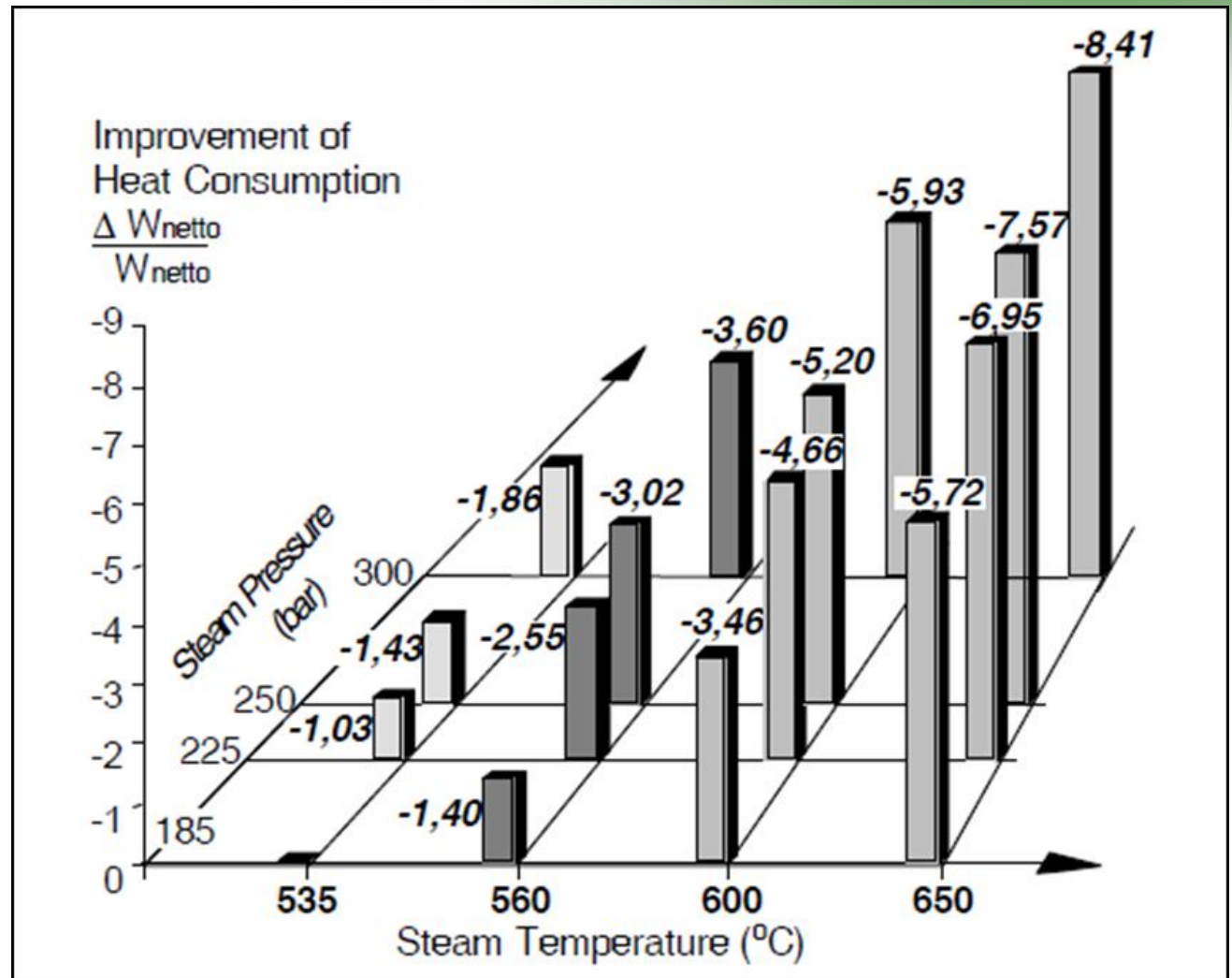
U **jaderných elektráren** jsou jejich pracovní parametry závislé na typu použitého reaktoru. Kromě namáhání použitých materiálů za zvýšených teplot a tlaků je nezbytné v aktivní zóně reaktoru posuzovat i vliv záření. V současných tlakovodních jaderných reaktorech se parametry chladiva pohybují na výrazně nižších hodnotách, než jsou kritické parametry. **Teplota nepřesahuje 350°C a tlak se drží do 16 MPa**. Protože jsou uvedené provozní parametry nižší než u tepelných elektráren, nižší je také účinnost (32 až 38%).

Žárupevné oceli - použití

Podkritické T do 538°C a p do 16,7 MPa, s účinností okolo 35%.

Superkritické T v rozmezí 540 až 566°C a p do 25 MPa, s účinností okolo 46%.

Ultra-superkritické T v rozmezí 580 až 620°C a p do 28 MPa, s účinností okolo 50%.



Vliv zvýšené teploty na vlastnosti oceli při zatěžování

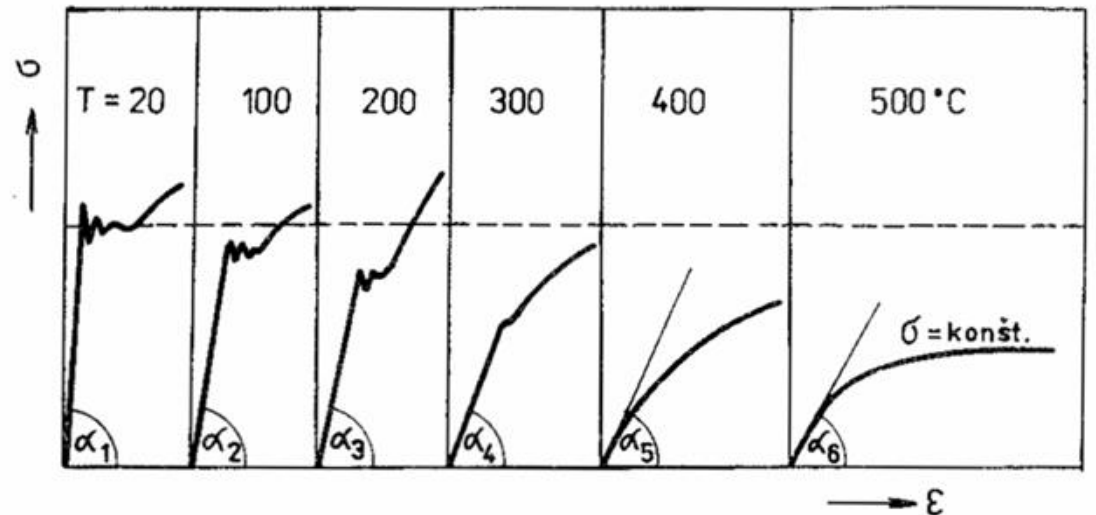
Vliv teploty na charakter tahového diagramu nízkouhlíkové nelegované oceli:

Teplota do 350°C:

- Postupně mizí výrazná mez kluzu,
- hodnota R_e klesá,
- deformace pohybem dislokací.

Teplota nad 350°C:

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



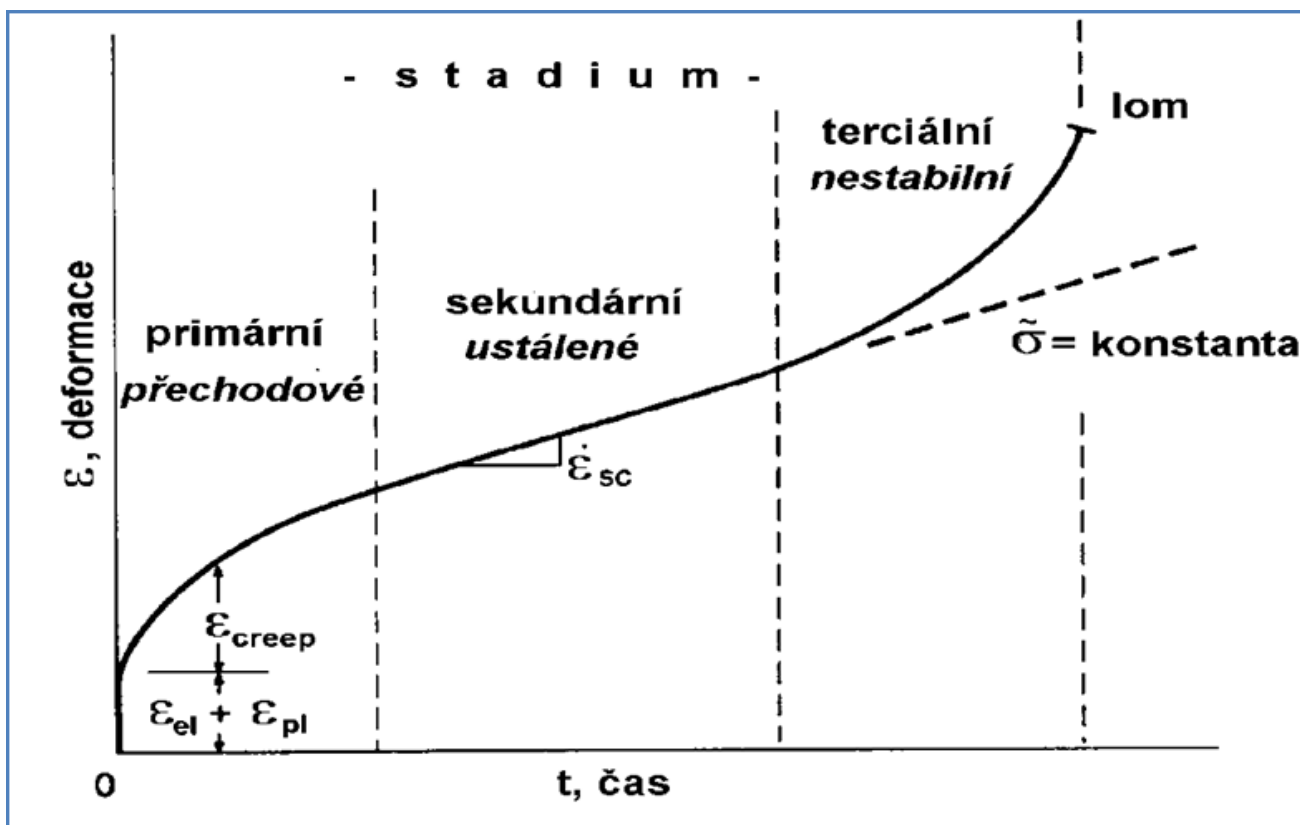
U tahové zkoušky oceli při pokojové teplotě je deformace závislá pouze na velikosti zatěžující síly, nezávisí na čase. Nemění-li se síla, nemění se ani prodloužení.

Zvýší-li se teplota ocelí nad asi 400°C, pak jsou změny délky při dlouhotrvajícím konstantním zatížení větší. Tato změna délky (tvaru) při dlouhodobém konstantním zatížení se nazývá **tečení nebo creep**.

Základní charakteristiky procesu tečení - creepu

Procesy tečení (creepu) se u kovových materiálů včetně ocelí projevují nad jejich homologickou teplotou T_c , která je dána přibližně vztahem $T_c > 0,4 T_m$, kde T_m je teplota tavení. Výjimkou jsou niklové superslitiny, u kterých může teplota T_c dosáhnout až $0,75 T_m$.

Creep - pomalá plastická deformace materiálu vyvolaná dlouhodobým působením **teploty a času**. Probíhá při napětích nižších nežli je mez kluzu.

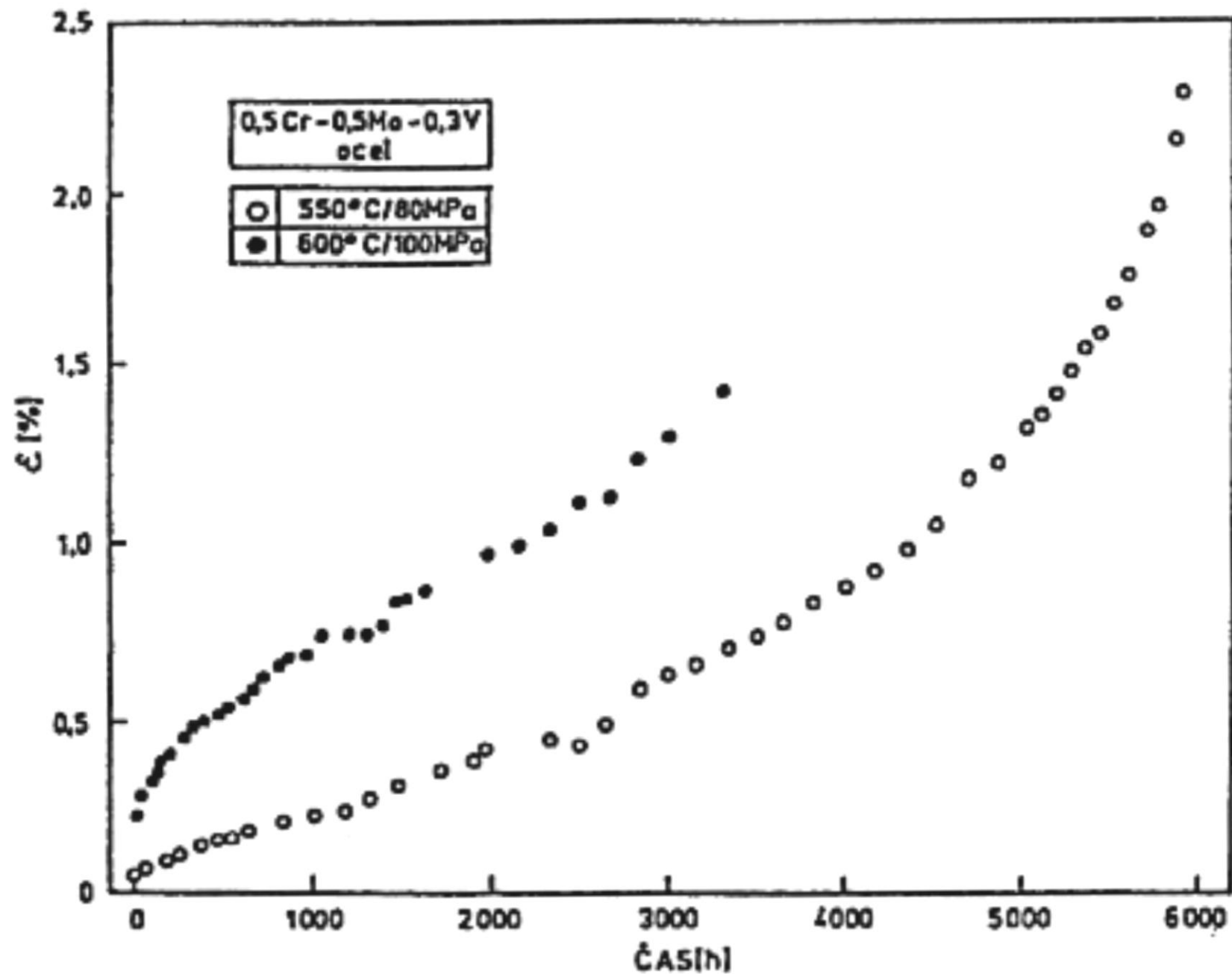


I. Stádium – Primární creep, je z technického hlediska málo významné. Dochází k prvotnímu nárůstu deformace v krátkém čase.

II. Stadium – Sekundární creep. Jde o ustálené tečení, kdy dochází k lineárnímu přírůstku deformace s časem po relativně dlouhou dobu expozice.

III. Stádium – Terciální creep, kdy dochází k intenzivnímu poškozování vnitřní struktury kovu, což vede k prudkému nárůstu deformace a následnému lomu.

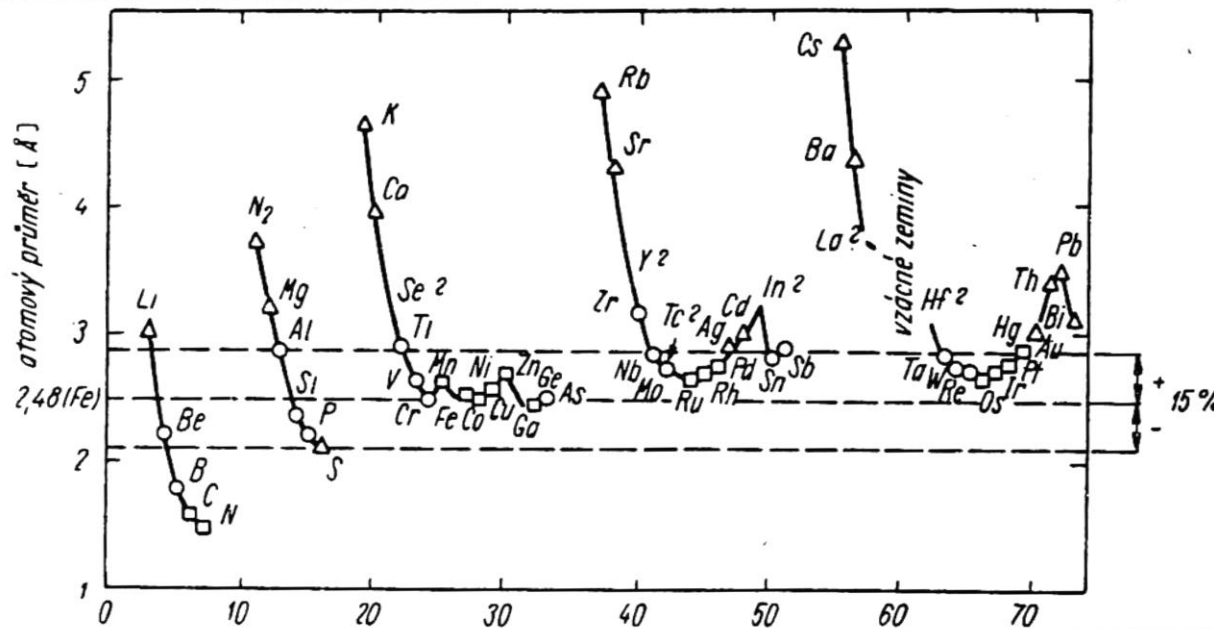
Základní charakteristiky procesu tečení - creepu



Faktory mající vliv na žárupevnost ocelí

Vývoj žárupevných ocelí se opírá o znalost **mechanizmů creepové deformace** a ve všech případech tyto mechanismy **souvisí s pohybem dislokací**. Na žárupevnost proto mají výrazný vliv faktory, zpevňující mřížku tuhého roztoku a tím omezující pohyb dislokací. Mezi základní faktory zpevnění mřížky patří:

- a) **Typ mřížky** základního tuhého roztoku. Oceli s austenitickou strukturou mají vyšší odolnost proti tečení než se strukturou feritickou. Důvodem je schopnost FCC mřížky vytvářet tzv. parciální dislokace s omezenou pohyblivostí mřížkou.
- b) **Substituční zpevnění** tuhého roztoku pomocí legujících prvků s velkým atomovým poloměrem způsobujících deformaci mřížky. S úspěchem se používá Mo a případně také W. Na zpevnění tuhého roztoku se podílí jen ta část Mo (W) v oceli, která není vázána ve formě sekundárních fází bohatých na tyto prvky. Proto není účelné zvyšovat obsah Mo a W v oceli nad mez rozpustnosti při pracovní teplotě. Účinek substitučního zpevnění se snižuje při tvorbě speciálních karbidů těchto prvků.



Faktory mající vliv na žárpevnost ocelí

c) **Přítomnost částic jemného precipitátu** ve struktuře (karbidy, nitridy, karbonitridy legujících prvků jako jsou Cr, Mo, V, Ti, Nb. U nízkolegovaných CrMo a CrMoV ocelí, podobně jako u feritických Cr ocelí se jedná o různé typy tvrdých karpidů typu Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, Mo_2C , V_4C_3 , NbC případně nitridů a karbomitridů typu VN, V(C, N), Nb (C, N), Ti (C, N), které účinně brání dislokačnímu pohybu pomocí tzv. Orowanova mechanismu. Jejich účinek se hodnotí podle tzv. střední vzájemné vzdálenosti částic L, která závisí na jejich počtu a jejich střední velikosti.




- Různé typy precipitátů (karbidy, nitridy, karbonitridy) mají různou termodynamickou stabilitu.
- Přednostně se tvoří ty, které mají nejnižší Gibbsovu energii (volnou entalpii).
- Prvky dle afinity k C jsou: Ti, Ta, Nb, Zr, V, Mo, W, Cr, Mn, Fe => stálost karpidů.
- Některé prvky tvoří složitější typ karpidů.
- Häggův velikostní faktor – kritický 0,59.
- Nejvhodnější N, C, CN – Ti, Nb, V, (W, Mo)

$$L = f(n_v \cdot d)^{-1/2}$$

n_v – střední počet částic v jednotce objemu
 d – střední průměr částice precipitátu

	IV	V	VI	VII	VIII
TiC		VC / V_4C_3	$Cr_{23}C_6$ Cr_7C_3 Cr_3C_2	$Mn_{23}C_8$ Mn_7C_3 Mn_3C	Fe_3C Fe_2C
ZrC		NbC / Nb_4C_3	Mo_2C MoC		
HfC		TaC Ta_2C	W_2C WC		

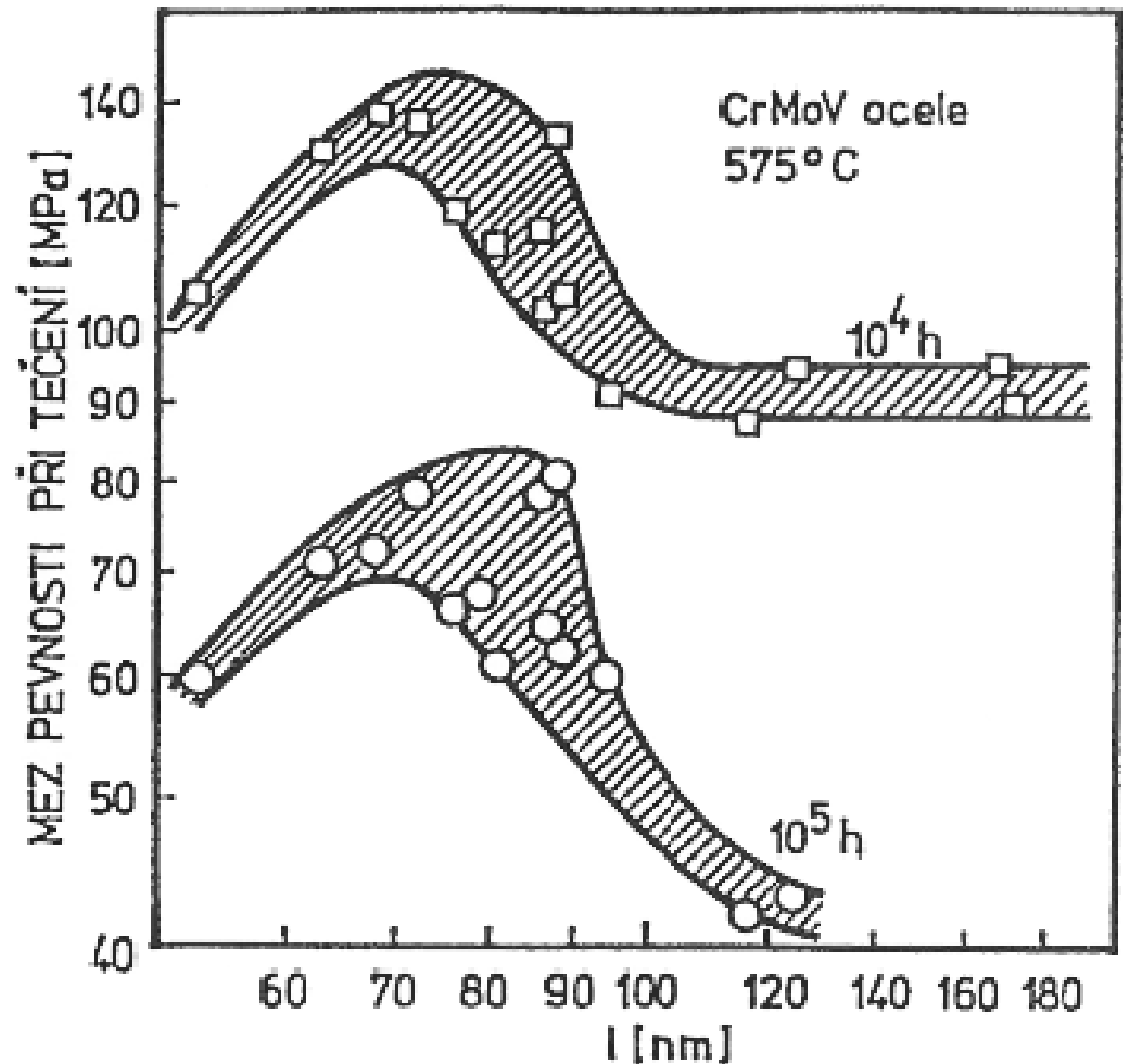
Krystaluje v soustavě:

-  kubické
-  hexagonální, tetragonální
-  orthorhombické

Žárupevné oceli

Vliv klesající vzájemné vzdálenosti částic precipitátu na mez pevnosti při tečení u nízkolegované CrMoV žárupevné oceli 15 128 (14MoV6-3).

Precipitační zpevnění se může příznivě projevit také u austenitických, zejména vyztvrditelných ocelí tvorbou jemné disperze karbidů a karbonitridů (při jejich legování N), případně disperzí dalších intermetalických fází.



Rozdělení žárupevných ocelí

Volba typu žárupevné oceli závisí na předpokládaných provozních podmínkách a požadovaném typu polotovaru:

- provozní teplota
- provozní tlak, provozní zatížení
- prostředí
- druh polotovaru (plechy, trubky, výkovky, odlitky)
- požadavky z hlediska zpracovatelských technologií
- ekonomická kritéria – cena materiálu podle stupně legování

Z hlediska úrovně legování a teploty použití je možno oceli rozdělit na:

Nelegované uhlíkové oceli

Nízkolegované oceli

Vysokolegované chromové oceli

Austenitické žárupevné oceli

Typ oceli	Použitelná teplota do °C	Skupina podle TNI CEN ISO /TR 15608
Uhlíkové kotlové oceli tř. 12 (do 0,2 hm. % C)	450 (480)	1
Nízkolegované oceli typu 15NiCuMoNb5 a 20MnMoNi5-5 (Ni,Mo,Cu)	540	4
Nízkolegované oceli tř. 15 (Cr, Mo, V, Ti, Nb, N, B)	560 (580)	5
Feritické chromové oceli tř. 17 (legované Cr:Mo; V; Nb; N)	600 (620)	6
Austenitické CrNi oceli (Nb; Zr; N)	Nevytvrditelné	650
	Vytvrditelné	750
		8

Rozdělení žárupevných ocelí

Z hlediska úrovně legování a teploty použití je možno oceli rozdělit na:

Nelegované uhlíkové oceli

Nízkolegované oceli

Vysokolegované chromové oceli

Austenitické žárupevné oceli

Typ oceli	Použitelná teplota do °C	Skupina podle TNI CEN ISO /TR 15608
Uhlíkové kotlové oceli tř. 12 (do 0,2 hm. % C)	450 (480)	1
Nízkolegované oceli typu 15NiCuMoNb5 a 20MnMoNi5-5 (Ni,Mo,Cu)	540	4
Nízkolegované oceli tř. 15 (Cr, Mo, V, Ti, Nb, N, B)	560 (580)	5
Feritické chromové oceli tř. 17 (legované Cr:Mo; V; Nb; N)	600 (620)	6
Austenitické CrNi oceli (Nb; Zr; N)	Nevytvrditelné	650
	vytvrditelné	750
		8

- Použití ocelí je pro teploty přesahující 750 (800)°C již prakticky nemožné z důvodu velmi nízké žárupevnosti i žáruvzdornosti.
- Pro vyšší teploty lze použít slitiny na bázi Ni do teplot 900 (1000)°C.
- Pro teploty nad 1200°C pak lze již použít pouze slitiny těžkých (vysokotavitelných) kovů jako jsou W, Mo, Nb.
- Pro teploty nad 1200°C lze také použít kovokeramické materiály (cermety) na bázi oxidů, např. TiO₂; ZrO₂; Al₂O₃; YO₂, případně karbidů SiC.

Děkuji Vám za pozornost.