2. Struktura a vlastnosti oceli, druhy ocelí

Rovnovážné a nerovnovážné struktury oceli, mechanické vlastnosti oceli, druhy konstrukčních ocelí.

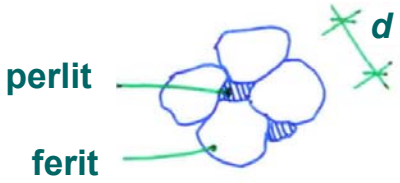
Struktura oceli

Železo (Fe), uhlík (C), "nečistoty". **Stavební oceli: 0,1 ÷ 0,2 % C**

Nečistoty:

- **nevyhnutelné … uhlíkové oceli**
  - **+ Mn, Si, Cu, Cr, Ni, Mo**
  - **- S, P, N, O**
- **úmyslné … legované oceli (použity legury)**

Pro < 723 °C zrna:



zrna d < 0,02 mm
nepravidelný, polyedrický tvar

(Petchova rovnice: $f_y = f_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$ [MPa])

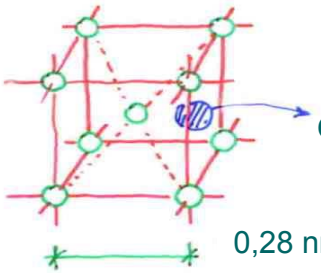
f_0: 5
k: 38

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Uspořádání v krystalické mřížce

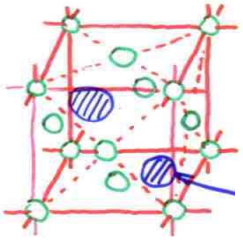
- prostorově středěné α - Fe
- plošně středěné γ - Fe

ferit



= tuhý roztok C v α - Fe
(prostorově středěná mřížka)

austenit



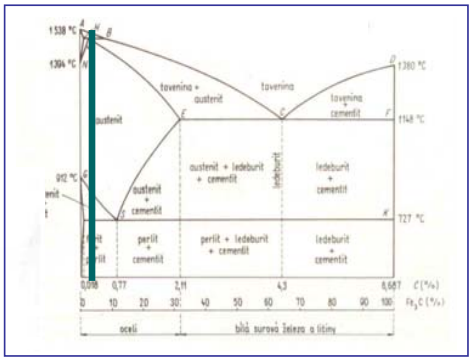
= tuhý roztok C v γ - Fe
(plošně středěná mřížka)

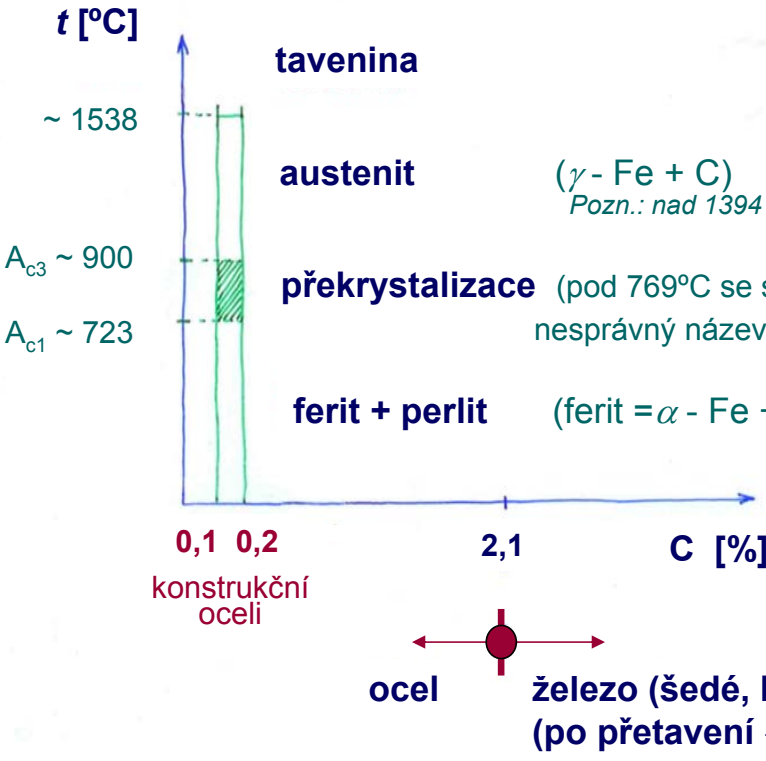
perlit (= ferit + Fe3C)

karbid železa (cca 6,67 %C)

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Rovnovážná struktura nízkouhlíkové oceli
(nastává při pomalém ochlazování)





(γ - Fe + C)

Pozn.: nad 1394 °C opět prostorově středěná mřížka, δ - Fe

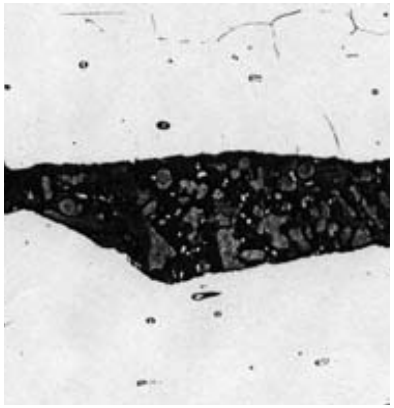
(pod 769ºC se stává magnetickou)
nesprávný název nad touto teplotou β - Fe

(ferit = α - Fe + C; perlit = ferit + Fe_3C)

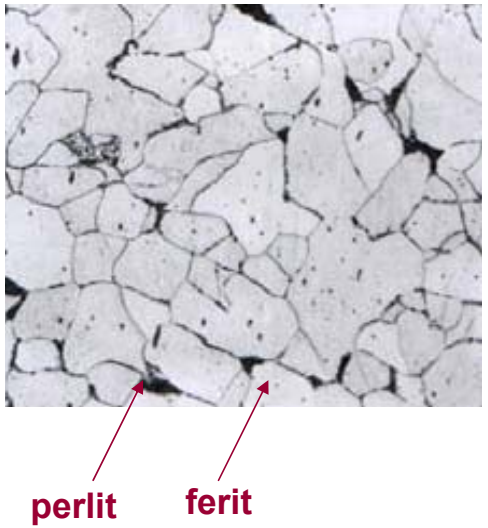
© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Litina
(C jako lamelární grafit)

Svářková ocel
struskové vměstky



Ocel
feriticko-perlitická struktura



© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Nerovnovážné struktury (vznikají při rychlém ochlazení, kalení):

Martenzit – jehlicovitá struktura, tvrdý ale křehký.

Pozor: může vzniknout v místě svarů (zejména je-li vysoký C_{ekv})!!
Proto u větších tlouštěk předehřev 150 ÷ 250 °C.
Oceli s vyšším C nebo legované se kalí snadněji, stačí nižší rychlost kalení.

Bainit (izotermické chlazení do oleje či roztavené soli na 550 °C: vyšší mez kluzu a pevnost, oproti martenzitické struktuře tvárný, houževnatý).

Sorbit (popouštění martenzitu na 600 °C: jedná se o „zušlechtění“ - pevný, tvárný).

Žíhání

Slouží k úpravě struktury, odstranění nerovnoměrné zrnitosti, tvrdosti, k získání stejnorodosti, odstranění reziduálních pnutí nebo zpevnění od tvarování za studena atd. Dvě hlavní skupiny: žíhání bez překrystalizace (pod 727 °C), žíhání s překrystalizací (nad ~ 900 °C). Hlavní jsou:

- **normalizační, pro jemnozrnnou a stejnoměrnou strukturu (těsně nad 900 °C ne více (hrubnutí zrna), následuje pomalé chladnutí $\Rightarrow$ přeměna α - γ - α)**

- **na odstranění reziduálních pnutí (600 - 650 °C, asi 30 min/25 mm tloušťky)**

+ řada dalších:
„rekrystalizační“ - k odstranění zpevnění od tváření za studena (550 ÷ 700 ºC),
„na měkko“ - ke zvýšení houževnatosti, snižuje se pevnost a tvrdost (650 ÷ 720 ºC),
atd.

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Základní vlastnosti oceli

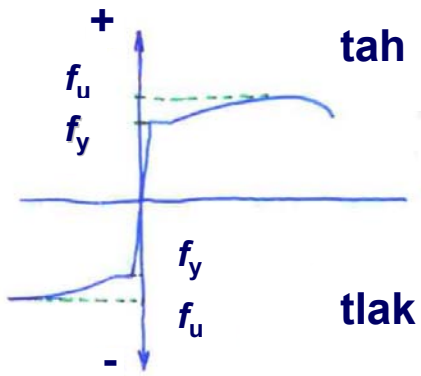
E = 210 000 MPa

G = 81 000 MPa

μ = 0,3

γ = 7,85 t/m^3

α = 0,000 012

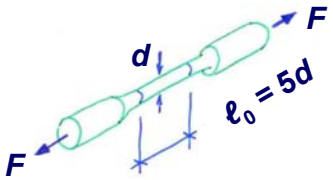


© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

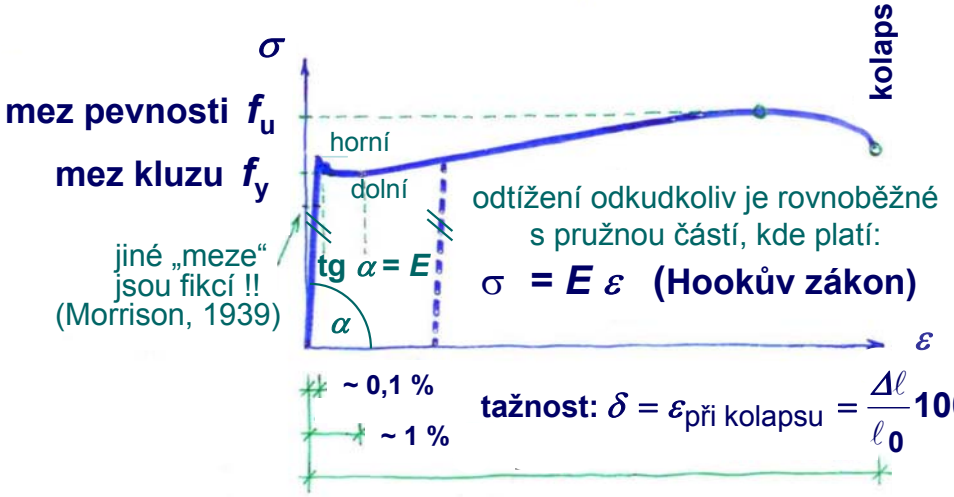
Mechanické vlastnosti

Tahová zkouška – pracovní diagram:

„krátká tyč“



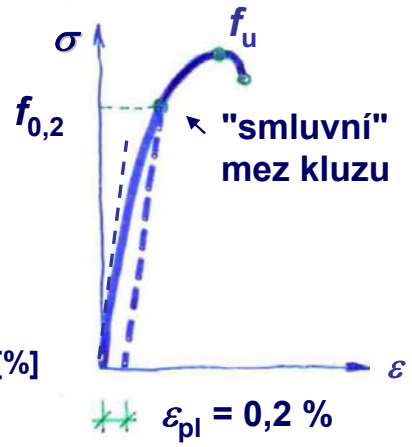
po dosažení meze pevnosti se tvoří zúžení, „krčekˇ (nerovnoměrná plastizace)



odtížení odkudkoliv je rovnoběžné s pružnou částí, kde platí:

$\sigma = E\,\varepsilon$ (Hookův zákon)

tažnost: $\delta = \varepsilon_{\text{při kolapsu}} = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} 100$ [%]



měkká uhlíková (nelegovaná) ocel

tažnost $\delta \approx 15 \div 25$ %

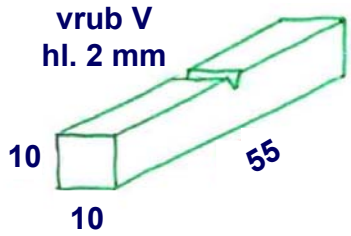
oceli bez výrazné meze kluzu

(legované či zpevněné tvářením za studena)

tažnost δ je různá

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Zkouška rázem v ohybu:

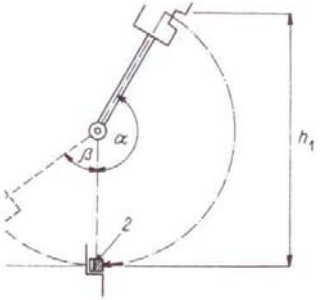


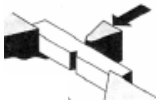
KCV

(dříve i vruby tvaru U, značení KCU)

Charpyho kladivo

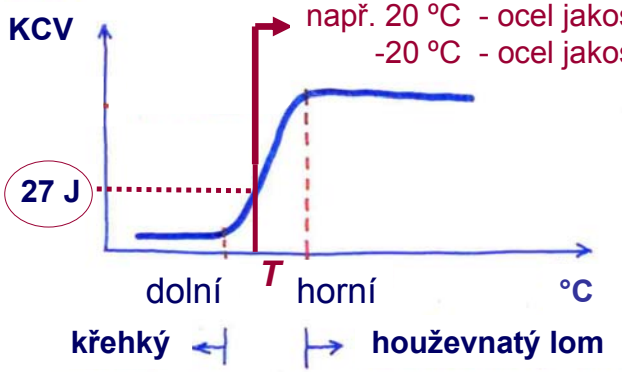
vyžaduje se
> 27 J
při dané
zkušební teplotě





výsledek: „vrubová houževnatost“
(spotřebovaná práce na přeražení v Joulech)

vyhovuje-li při této zkušební teplotě *T*
např. 20 °C - ocel jakostního stupně JR
-20 °C - ocel jakostního stupně J2



Přechodové teploty:

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Jakostní stupeň (úroveň lomové houževnatosti)

- určuje "křehkolomové vlastnosti":

a) Běžné oceli - značení:

JR, J0, J2 **min. spotřebovaná práce 27 J** **při T = 20 °C, 0 °C, - 20 °C**

K2 **40 J** **při T = - 20 °C**

b) Tepelně upravené, jemnozrnné oceli: značení M, N, ML, NL, Q, QL, QL1

Mají požadavky na teplotu zkoušení a spotřebovanou práci uvedené v Eurokódu ČSN EN 1993-1-10 „Houževnatost materiálu a vlastnosti napříč tloušťkou“. **Vesměs dobré vlastnosti**.

Použití:

Při výběru oceli se postupuje podle tabulky ČSN EN 1993-1-10. Stanovuje se potřebný jakostní stupeň podle:

- referenční teploty konstrukce (v ČR se bere ≈ - 40 °C),

- napjatosti od mimořádné kombinace zatížení (→ tah, tlak),

- tloušťky prvku t_{min}.

např.	S235JR	velký tah: lze pro $t \leq 25$ mm	tlak: lze pro $t \leq 65$ mm
	S235J0	velký tah: lze pro $t \leq 35$ mm	tlak: lze pro $t \leq 85$ mm
	S355J0	velký tah: lze pro $t \leq 20$ mm	tlak: lze pro $t \leq 70$ mm

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Zkoušky svařitelnosti

Klasifikace (hutě):	**zaručená**	**(pro T > 0°C)**
	podmínečná	**(nutný předehřev 150-250 °C)**
	dobrá	**(vyhovuje bez záruky)**
	obtížná	**(nevyhovující svary)**

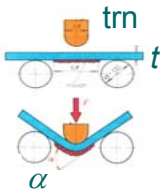
Hutě běžně uvádějí rovněž uhlíkový ekvivalent CE (totéž CEV).

Pro neznámé oceli je nutné určit svařitelnost zkouškou:

1. **rázová zkouška s vrubem ve svaru** (odtud jakostní stupeň zaručující svařitelnost)
2. **návarová zkouška ohybem**

   provést návar na tažené straně vzorku

   ohnutí na daný úhel α musí být bez trhlin



3. **zjištěním „uhlíkového ekvivalentu“, CE < 0,4** (na spektrometru, analyzátoru)

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \leq 0{,}4$$

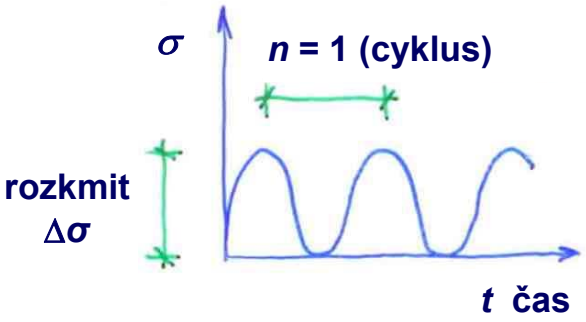
(pro tloušťky materiálu t > 6,5 mm méně, např. pro t = 50 mm: CE ≤ 0,3).

(Pozn: pro legované oceli se používá modifikovaný vztah CET).

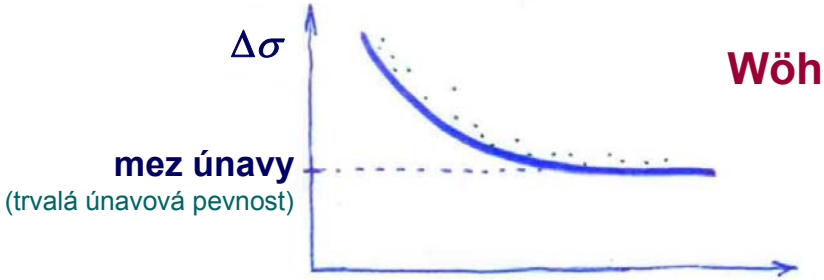
© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Zkouška na únavu

na pulsátoru



porušení při *n* cyklech



Wöhlerova křivka

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Zkouška tvrdosti:

- měří se otisk nebo hloubka zatlačení podle dané zkoušky:

HB	**Brinell**	**kalená kulička**
HR	**Rockwell**	**diamantový kužel, kulička**
HV	**Vickers**	**diamantový jehlan**
		(např. 200 HV pro předpjaté šrouby)

Oceli (obecné rozdělení)

(podle ČSN EN 10020 Definice a rozdělení ocelí)

- **nelegované (uhlíkové):** stanoven max. obsah legur
  - jakostní (konstrukční oceli)
  - ušlechtilé (strojní oceli)
- **legované:** větší obsah legur než stanoveno pro nelegované
  - jakostní
  - ušlechtilé (kontrolované složení a výroba)
- **korozivzdorné:** min. 10,5 % Cr, max 1,2 % C

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Nejdůležitější oceli pro stavební konstrukce:

v ČR zcela výjimečně

- nelegované oceli jakostní, třídy: S235, S275, S355

S235JR, S235J0 (běžné konstrukční oceli) f_y **= 235 MPa,** f_u **= 360 MPa**

S355J0, S355J2 (běžné konstrukční oceli) f_y **= 355 MPa,** f_u **= 490 MPa**

Označení stavu: +N (stav po normalizačním žíhání), +AR (stav po válcování - as rolled).

Značení např.: S235J0+N, S355J2+AR

Pozn.: pro tloušťky prvků t > 40 mm jsou meze kluzu i pevnosti nižší (vesměs o 20 MPa).

- legované ušlechtilé jemnozrnné oceli s vyšší mezí kluzu, třídy: S420, S460, S500, S550, S620, S690, S700, S890, S960 (číslo určuje mez kluzu při $t \leq 40$ mm)

Značení stavu: N, M, NL, ML, Q, Q1 (válcování normalizační; termomechanické; pro nízké teploty s méně P,S; kalené a popouštěné, viz závěr přednášky).

Značení např.: S420ML, S460Q.

- legované ušlechtilé oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi

tzv. patinující oceli, příměs Cr, Cu, Si, Ni, Mo … typ „Corten“ (USA, cca od r. 1940).

Podle Eurokódů: S355J0W (obchodní značka v ČR Atmofix A),

S355J2W (Atmofix B, nově od Arcelor Mittal Ostrava: Arcorox®).

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Doplňující informace

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Oceli se zvýšenou mezi kluzu a oceli vysokopevnostní:

Stále více se pro extrémně namáhané, ale i běžné konstrukce aplikují jemnozrnné oceli, např.:

Francie - Millau Viaduct (celkem 43 Mt oceli, z toho 18 Mt ocel S460M).
Německo - most v Düsseldorfu přes Rýn (již 2002): pylony z oceli S460ML.
Norsko: polovina všech nových mostů z TM (termomechanicky zpracovaných) ocelí.

Normalizační válcování (N): válcování při ~ 950 ºC, později ohřátí na ~ 900 ºC, chlazení na vzduchu. Výsledkem je jemnozrnná ocel, vyšší CE (pro t < 50 mm ≈ 0,42), odpovídající křehkolomové vlastnosti K2 (40 J při -20 ºC);

Termomechanické válcování (M): řízené válcování jak v austenitické oblasti (~ 950 ºC), tak v překrystalizační oblasti (pod ~ 900 ºC). Výsledkem je jemnozrnná ocel, nízký CE (pro t < 50 mm ≈ 0,34), vlastnosti K2;

Oceli do nízkých teplot (L): upravené složení, křehkolomové vlastnosti J5 (27 J při -50 ºC);

Kalená a popouštěná ocel (quenched steel, Q): rychlé chlazení (vodou) pod 300 ºC, popouštění k teplotě překrystalizace. Vzniká popuštěný martenzit (částečně bainit). Vysoká pevnost (až S1100), vyšší CE (t < 20 mm ≈ 0,42, t > 80 mm ≈ 0,72). Křehkolomové vlastnosti: 30 J pro: Q při -20 ºC, pro QL při -40 ºC.

Oceli vysoké pevnosti (f_y i přes 1000 MPa) jsou legovány niobem (vysoká pevnost, vysoká houževnatost).

Předehřevy pro svařování:

S355J2	nad t = 30 mm nutný;
S355M, S460M	do 100 mm bez předehřevu (event. nízký, do 100 ºC).

© Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.