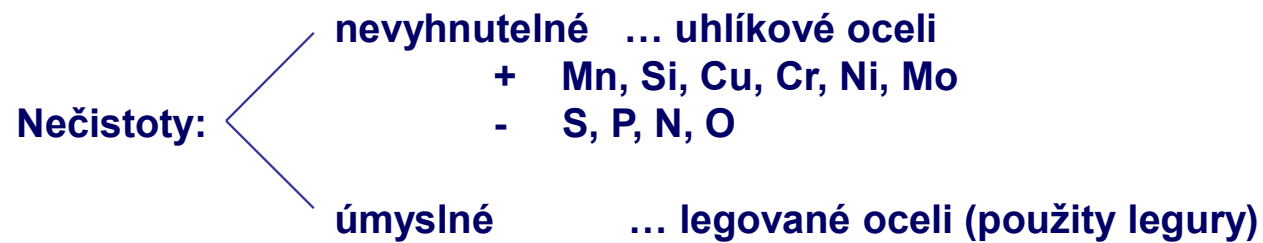


2. Struktura a vlastnosti oceli, druhy ocelí

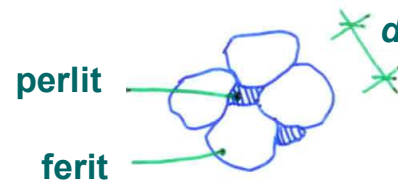
Rovnovážné a nerovnovážné struktury oceli, mechanické vlastnosti oceli, druhy konstrukčních ocelí.

Struktura oceli

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



Pro < 723 °C zrna:



zrna $d < 0,02$ mm
nepravidelný, polyedrický tvar

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

5 38

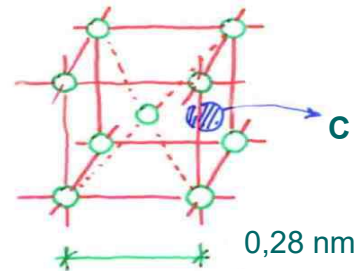
NNK – ocelové konstrukce (2)

1

Uspořádání v krystalické mřížce

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

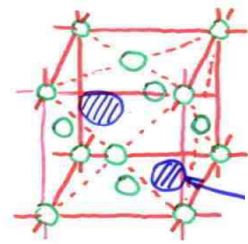
ferit



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

C (0,08 %)

austenit



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

umístí se
více C (2 %)

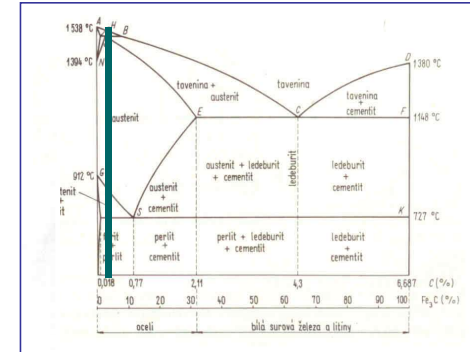
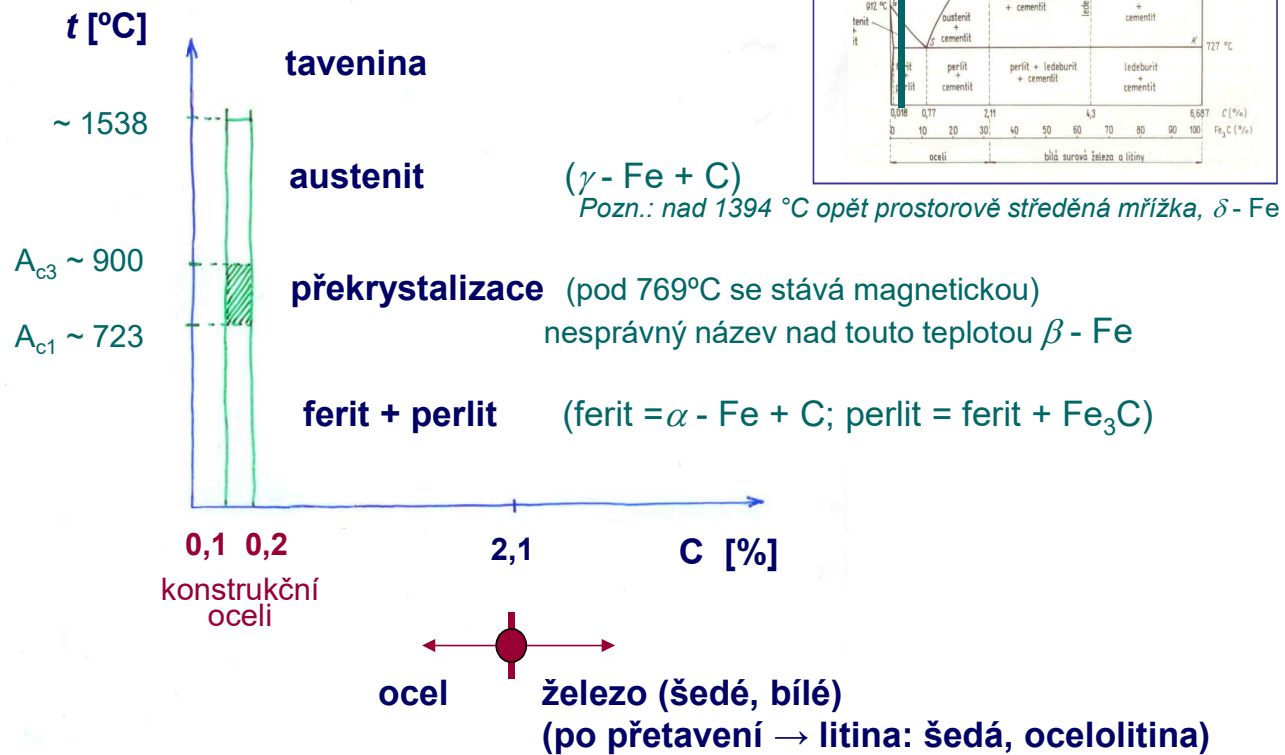
perlit (= ferit + Fe_3C)

karbid železa (cca 6,67 %C)

NNK – ocelové konstrukce (2)

2

Rovnovážná struktura nízkouhlíkové oceli (nastává při pomalém ochlazení)



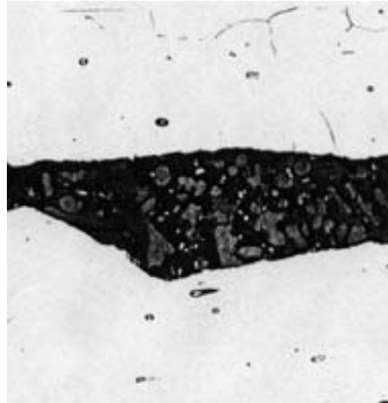
NNK – ocelové konstrukce (2)

3

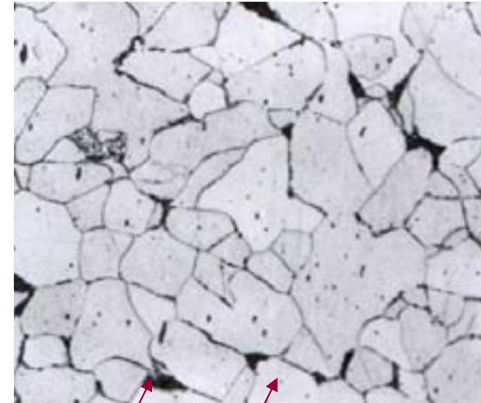
Litina
(C jako lamelární grafit)



Svářková ocel
struskové vměšky



Ocel
feriticko-perlitická struktura



perlit

ferit

NNK – ocelové konstrukce (2)

4

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 tloušťek 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, proti martenzitické struktuře tvárný, houževnatý).

Sorbit (popouštění martenzitu na 600 °C: jedná se o „zušlechtní“ - 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 překrytalizace (pod 727 °C), žíhání s překrytalizací (nad ~ 900 °C). Hlavní jsou:

- **normalizační, pro jemnozrnnou a stejnoměrnou strukturu (těsně nad 900 °C ne více (hrubnutí zrna), následuje pomalé chladnutí ⇒ přeměna $\alpha - \gamma - \alpha$)**
- **na odstranění reziduálních pnutí (600 - 650 °C, asi 30 min/25 mm tloušťky)**

+ řada dalších:

„rekrytalizační“ - k odstranění zpevnění od tváření za studena (550 ÷ 700 °C),

„na měkko“ - ke zvýšení houževnatosti, snižuje se pevnost a tvrdost (650 ÷ 720 °C), atd.

Základní vlastnosti oceli

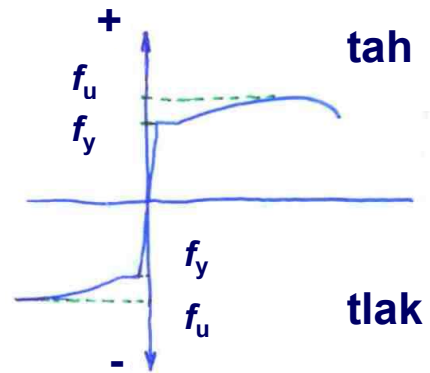
$$E = 210\,000 \text{ MPa}$$

$$G = 81\,000 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,3$$

$$\gamma = 7,85 \text{ t/m}^3$$

$$\alpha = 0,000\,012$$



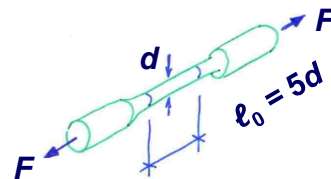
NNK – ocelové konstrukce (2)

6

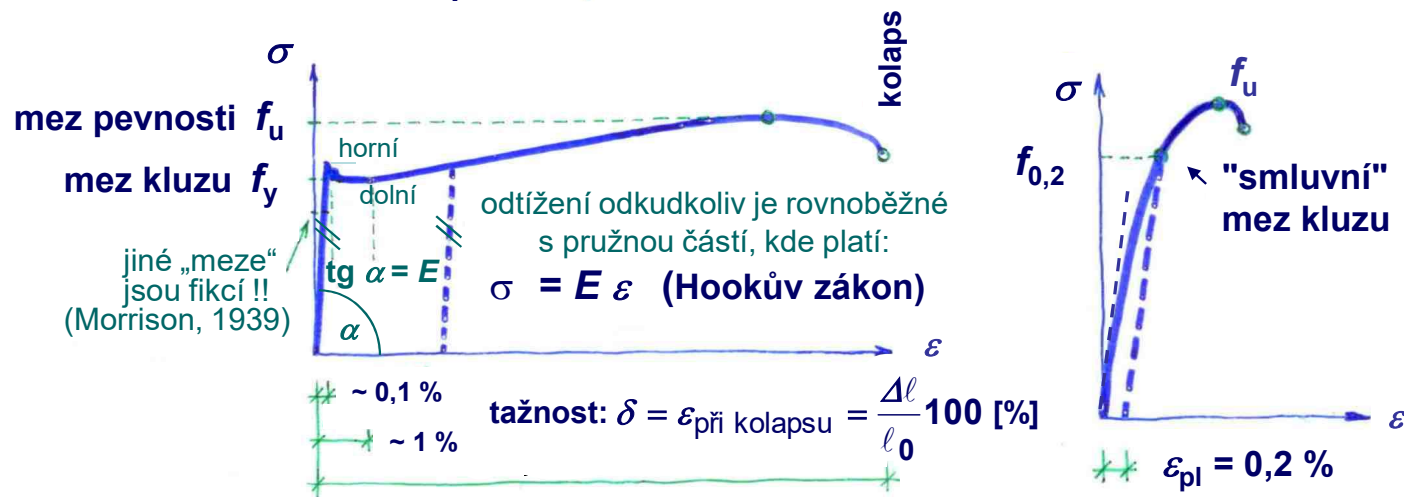
Mechanické vlastnosti

Tahová zkouška – pracovní diagram:

„krátká tyč“



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



měkká uhlíková (nelegovaná) ocel

tažnost $\delta \approx 15 \div 25$ %

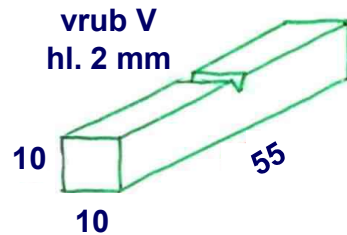
oceli bez výrazné meze kluzu

(legované či zpevněné tvářením za studena)
tažnost δ je různá

NNK – ocelové konstrukce (2)

7

Zkouška rázem v ohybu:

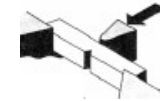
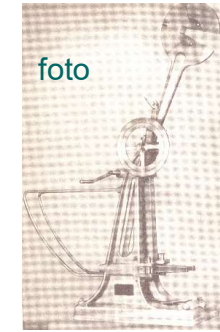
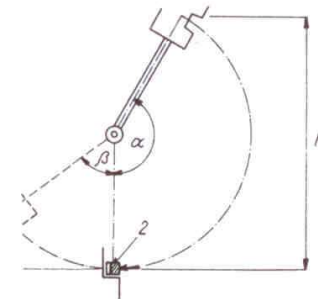


KCV

(dříve i vruby tvaru U, značení KCU)

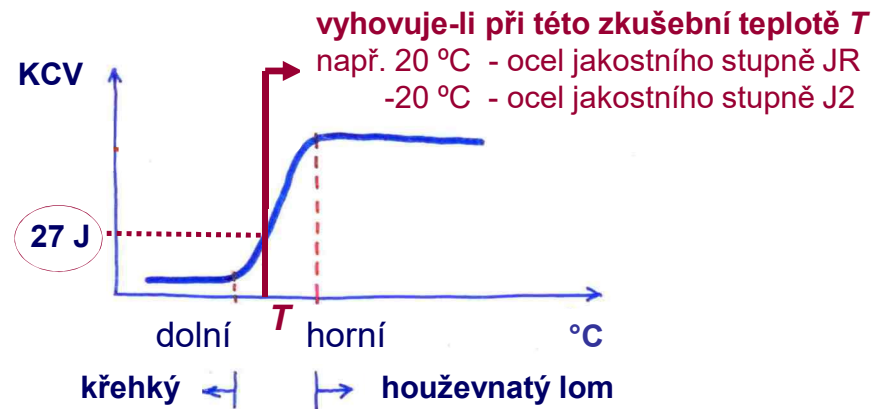
Charpyho kladivo

vyžaduje se
> 27 J
při dané
zkušební teplotě



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

Přechodové teploty:



NNK – ocelové konstrukce (2)

8

Jakostní stupeň (úroveň lomové houževnatosti)

- určuje "křehkolomové vlastnosti":

a) Běžné oceli - značení:

JR, J0, J2 min. spotřebovaná práce 27 J při $T = 20\text{ °C}$, 0 °C , -20 °C
 K2 40 J při $T = -20\text{ °C}$

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 (-35 - -5) = -40 °C ,
- napjatosti od mimořádné kombinace zatížení (→ tah, tlak),
- tloušťky prvku t_{\min} .

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

Zkoušky svažitelnosti

| | | |
|----------------------------|----------------|--------------------------------|
| Klasifikace (hutě): | zaručená | (pro $T > 0^{\circ}\text{C}$) |
| | podmínečná | (nutný předehřev 150-250 °C) |
| | dobrá | (vyhovuje bez záruky) |
| | <u>obtížná</u> | <u>(nevyhovující svary)</u> |

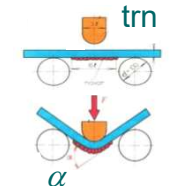
Hutě běžně uvádějí rovněž uhlíkový ekvivalent CE (totéž CEV).

Pro neznámé oceli je nutné určit svažitelnost zkouškou:

1. rázová zkouška s vrubem ve svaru (odtud jakostní stupeň zaručující svažitelnost)
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: $CE \leq 0,3$).

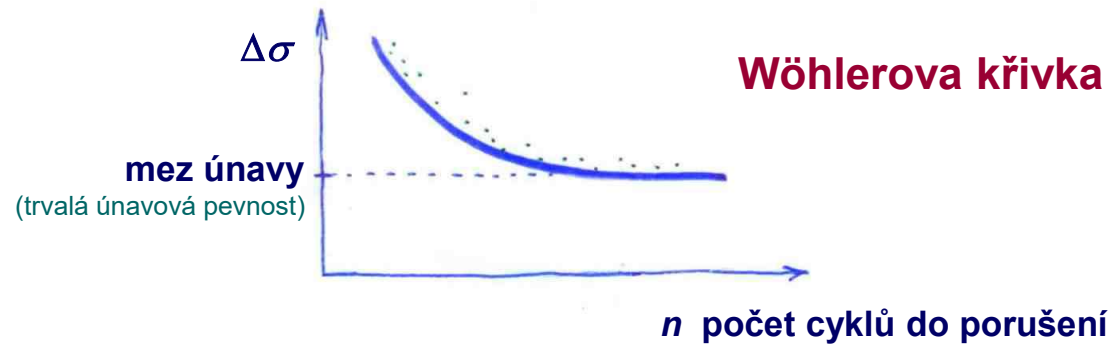
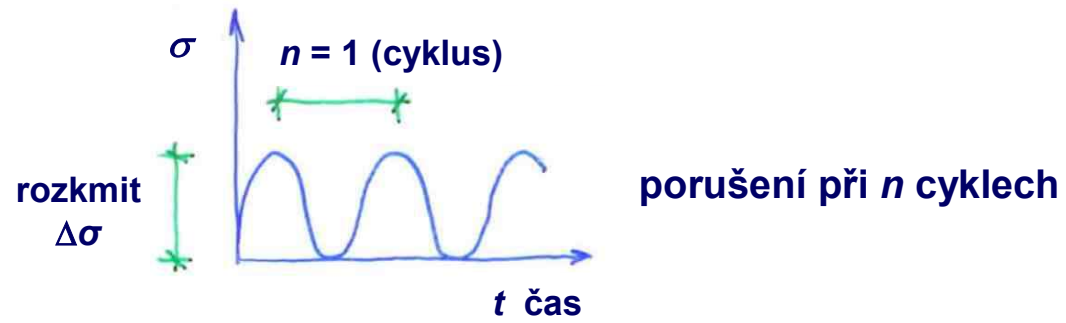
(Pozn: pro legované oceli se používá modifikovaný vztah CET).

NNK – ocelové konstrukce (2)



10

Zkouška na únavu na pulsátoru



NNK – ocelové konstrukce (2)

11

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

Nejdůležitější oceli pro stavební konstrukce:

- nelegované oceli jakostní, třídy: S235, **S275**, S355 v ČR zcela výjimečně
- | | |
|--|---|
| S235JR, S235J0 (běžné konstrukční oceli) | $f_y = 235 \text{ MPa}$, $f_u = 360 \text{ MPa}$ |
| S355J0, S355J2 (běžné konstrukční oceli) | $f_y = 355 \text{ MPa}$, $f_u = 490 \text{ MPa}$ |
- Označení stavu: +N (stav po normalizačním žíhání), +AR (stav po válcování - as rolled).
Značení např.: S235J0+N, S355J2+AR
- Pozn.: pro tloušťky prvků $t > 40 \text{ mm}$ 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 $t \leq 40 \text{ mm}$)
- 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®).

Doplňující informace

NNK – ocelové konstrukce (2)

14

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 °C, později ohřátí na ~ 900 °C, chlazení na vzduchu. Výsledkem je jemnozrnná ocel, vyšší CE (pro $t < 50$ mm $\approx 0,42$), odpovídající křehkolomové vlastnosti K2 (40 J při -20 °C);

Termomechanické válcování (M): řízené válcování jak v austenitické oblasti (~ 950 °C), tak v překryštalizační oblasti (pod ~ 900 °C). Výsledkem je jemnozrnná ocel, nízký CE (pro $t < 50$ mm $\approx 0,34$), vlastnosti K2;

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

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

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

Přehřevy pro svařování:

S355J2

nad $t = 30$ mm nutný;

S355M, S460M

do 100 mm bez přehřevu (event. nízký, do 100 °C).

NNK – ocelové konstrukce (2)

15