

NAVRHOVÁNÍ NOSNÝCH OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ

**Prof. Josef Macháček B623
(akad. rok 2018/2019)**

Doporučená a doplňková literatura:

- Trahair, Bradford, Nethercot, Gardner: The behaviour and design of steel structures to EC3. Taylor & Francis, 2008, 490 s. (ISBN: 978-0-415-41865-2)
- Studnička: Navrhování nosných konstrukcí – ocelové konstrukce. Skriptum ČVUT, 2017.

- | | |
|-------------------|--|
| 1. týden: | Historie, unikátní stavby, výroba oceli. |
| 2. týden: | Struktura a vlastnosti oceli, druhy ocelí. |
| 3. týden: | Výroba a montáž, navrhování OK. |
| 4. týden: | Tažené a tlačené pruty, stabilita prutů. |
| 5. týden: | Ohýbané nosníky. |
| 6. týden: | Příhradové nosníky, kombinace namáhání. |
| 7. týden: | Šroubované spoje. |
| 8. týden: | Svařované spoje. |
| 9. týden: | Spřažené ocelobetonové nosníky. |
| 10. týden: | Ochrana OK proti korozi a proti požáru. |
| 11. týden: | Dřevo, materiálové vlastnosti. |
| 12. týden: | Navrhování dřevěných konstrukcí, konstrukce ze dřeva. |

1. Historie, unikátní stavby, výroba oceli

Historický vývoj, příklady staveb, ocel ve stavebnictví, výroba oceli.

Historie

3800 B.C.

- meteoritského původu

1600 B.C.

- kujné železo z rud (Mesopotamie, Egypt)

Ocelový sloup v Delhi (Indie), 375÷413 A.D.:
(malá koroze díky vyššímu obsahu fosforu)

1400

- vysoké pece s dřevěným uhlím (Švédsko)
stavby z litiny

1709

- koks (Angličan Darby I) (Číňané již kolem 1010)

1784

- svářková ocel, těstovitý stav (Angličan Cort)
pudlovací pec, nepatrně C, Mn, Si
⇒ vměstky strusky, S > 0,1%, po válcování vláknitá

1848

- I nosník (Francouz Zorés)

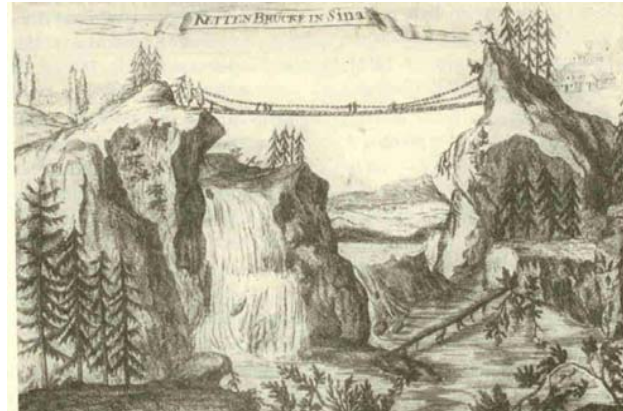
1855

- plávková ocel, tekutý stav (Angličané Bessemer
a Thomas - v konvertorech)



Stavby

Železo jako nosný materiál od 14. stol.:
Čína, řetězové mosty, $L \approx 60$ m
(dynastie Ming)



Litina: šedá litina v Anglii,
první most odlitý v Coalbrookdale
"Ironbridge", 1779, $L = 30$ m
(Darby III, návrh Pritchard)



NNK – ocelové konstrukce (1)

3

Unikátní litinová konstrukce:

**Pontcysyllte Aqueduct přes řeku Dee
1805, $L = 16$ m (18 polí)
součást Llangollen Canal (Wales-England)**

**V poli 4 litinové oblouky a litinový žlab
(se šroubovanými spoji s rybinovým
stykem těsněným flanelem máčeným
v cukru, zalitým olovem)**

**19 zděných dutých pilířů výšky 39 m
(Telford & Jessop)**



NNK – ocelové konstrukce (1)

Svářková ocel:

ve Walesu, silniční a železniční mosty,
např. visutý řetězový silniční most
Menai Bridge
(přes úžinu Menai na ostrov Anglesey)
 $L = 176$ m, 1826 (Telford)

V roce 1938 řetězy vyměněny za ocelové.



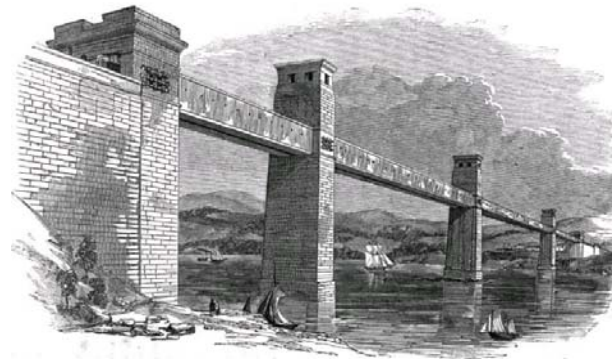
Britannia, železniční

$L = 70+140+140+70$ m 1850 (Rob. Stephenson)

1847 most přes řeku Dee z litiny se mu zřítíl;

1848 obdobný železniční most v Conwy
(prosté pole 122 m), dosud v provozu.

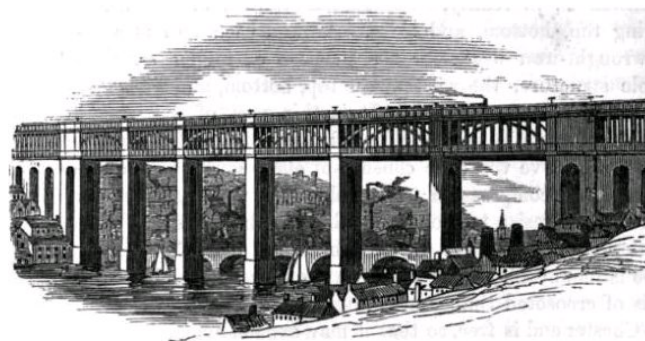
dnes:
(po 1970)



NNK – ocelové konstrukce (1)

**High Level Bridge Newcastle,
 $L = 6 \times 38 \text{ m}$, 1849 (Rob. Stephenson)**

Horní železniční, dolní silniční.
Oblouky ještě litinové, táhlo a závěsy svárek.



**Royal Albert Bridge, Plymouth,
železniční, $L = 2 \times 139 \text{ m}$, 1859 (Brunel)**

Železniční, spojitý čočkovitý nosník, horní dutý
oblouk (oválný, cca $5,1 \times 3,7 \text{ m}$, $t = 12 \div 19 \text{ mm}$),
dolní z dvojice řetězů, vyvěšená železniční mostovka.



NNK – ocelové konstrukce (1)

6

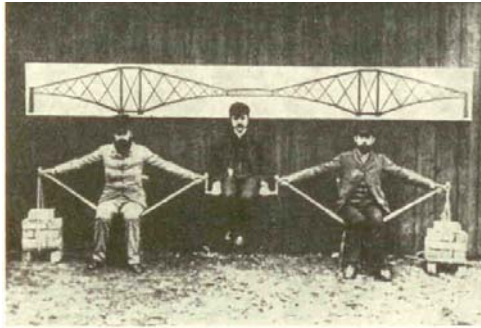
Plávková ocel:

Firth of Forth Bridge, Edinburgh

$L = 207+47+518+82+518+47+207$ [m] celkem s předpolími 2467 m.

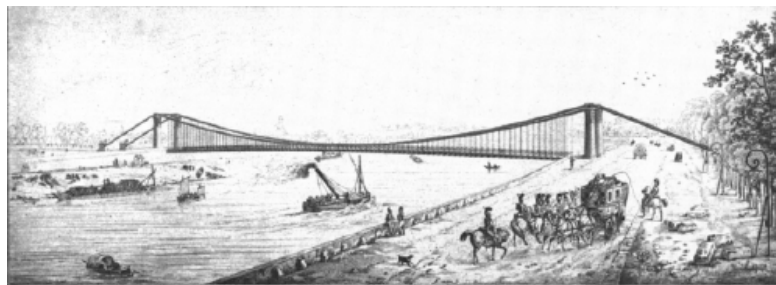
1890 (Baker & Fowler)

(poslední nýt „zlatý“, budoucí král Edward VII, Eiffel)



**Ve stejnou dobu ještě svárek (zhruba do r. 1900)
např. Eiffelova věž, 1889.**

Neúspěchy:
Navier: visutý most v Paříži
(zřítíl se 1826)



Žel. most přes úžinu Tay,
litina + svárek
Bouch (zřítíl se 1879)



Sv. Vavřinec Quebec
Szlapka & Cooper
(1907, 1916, dostavěn 1917)



NNK – ocelové konstrukce (1)

České země:

Bedřich Schnirch – celkem 15 řetězových mostů v Čechách a Maďarsku, např.:

- přes řeku Moravu, 1824, $L = 30\text{m}$ (první řetězový v kontinentální Evropě);
- přes řeku Ohři, 1836, $L = 68\text{ m}$;
- řetězový v Praze (most císaře F. J. - dnes most Legií), 1841, $L = 33+132+33\text{ m}$;
- v Podolsku (Stádlec), 1848, $L = 91\text{ m}$):

Stádlec:

1960 rozebrán

1974 uveden do provozu



NNK – ocelové konstrukce (1)

Stavby současnosti (stav 2/2019)

Nejvyšší stavby světa (různé kategorie):

TV Vysílače

1. Vysílač Fargo (North Dakota) 629 m (1963)

1a. Vysílač Varšava 643 m (1974-1991)

TV věže

1. Tokyo Skytree (Japan), 634 m, (2011)

2. Canton Tower (China), 600 m, (2010)

Vrtné plošiny

1. Petronius platform 535+75 = 610 m (2000)
(nafta, plyn, deformace až 12 m)



Budovy (stav 2/2019) – více viz OK01

Žebříčky výšek podle:

- střechy (uváděno jako hlavní)
- nejvyššího bodu budovy (anténa)
- nástavby (věžička, neuvedeno)

1. Burj Khalifa **828 (830) m, 163 podl., 2010**
2. Shanghai Tower **632 (632) m, 128 podl., 2015**
3. Ping An Finan. Centre (Shenzhen) **559 (601) m, 115 podl., 2017**



SAE

konstrukce: W.F. Baker
(Skidmore, Owings and Merrill)



konstr.: Thornton-Tomasetti G.
(Shanghai Constr. Group)



konstr.: Thornton-Tomasetti G.
(China Constr. 1st Building Group)

NNK – ocelové konstrukce (1)

11

Burj Khalifa (více viz OK01)

↙ arabsky "věž"



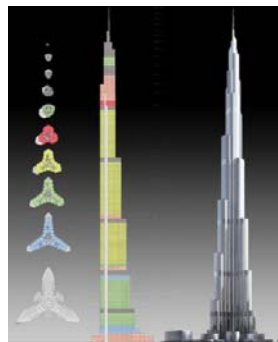
NNK – ocelové konstrukce (1)

12

Burj Khalifa



- Projekt:** Skidmore, Owings and Merrill (NY)
Hlavní inženýr: W. F. Baker; **arch.:** A. Smith
- 0-586 m: beton $\sim$ C65 (zařízení z Německa) (střední jádro, $t=80$ cm);
 - 586-830 m: ocel;
 - plášť: sklo, hliníkové slitiny, nerez;
 - 192 pilot $\varnothing$ 150 cm do hloubky 50 m (na pískovec) a 650 $\varnothing$ 90 cm do 36 m;
 - na stavbě 7 500 dělníků;
 - do 37 patra hotel, výše byty.



Půdorys tvaru Y.

NNK – ocelové konstrukce (1)

13

Budovy ve stavbě (stav 2/2019)

	podlaží	výška [m]	stavba
• Kingdom Tower (Jeddah, Saudi A.)	167+	1000 (1000)	2013-21
• Suzhou Zhongnan Center (Čína)	137	729 (729)	2014-20
• KL118 (Kuala Lumpur)	118	644	2014-20
• Wuhan Greenland Center (Čína)	121	610 (648)	2011-22



Kingdom Tower



Suzhou Zhongnan Center



KL118



Wuhan Greenland Center

NNK – ocelové konstrukce (1)

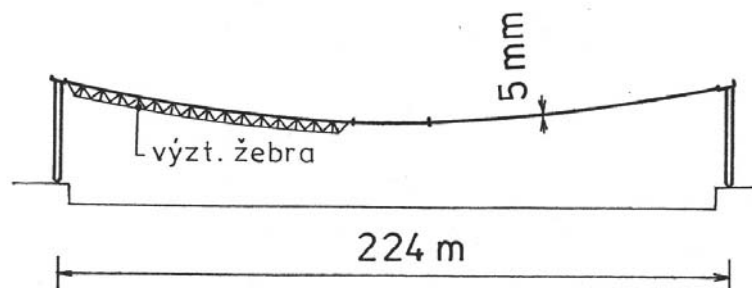
Největší rozpětí hal na světě

**Singapur – národní
stadion, 2014
(310 m)**

**{ Peking – OH 2008
332 m, ale s otvorem }**



**Moskva OH 1980
(membrána)**



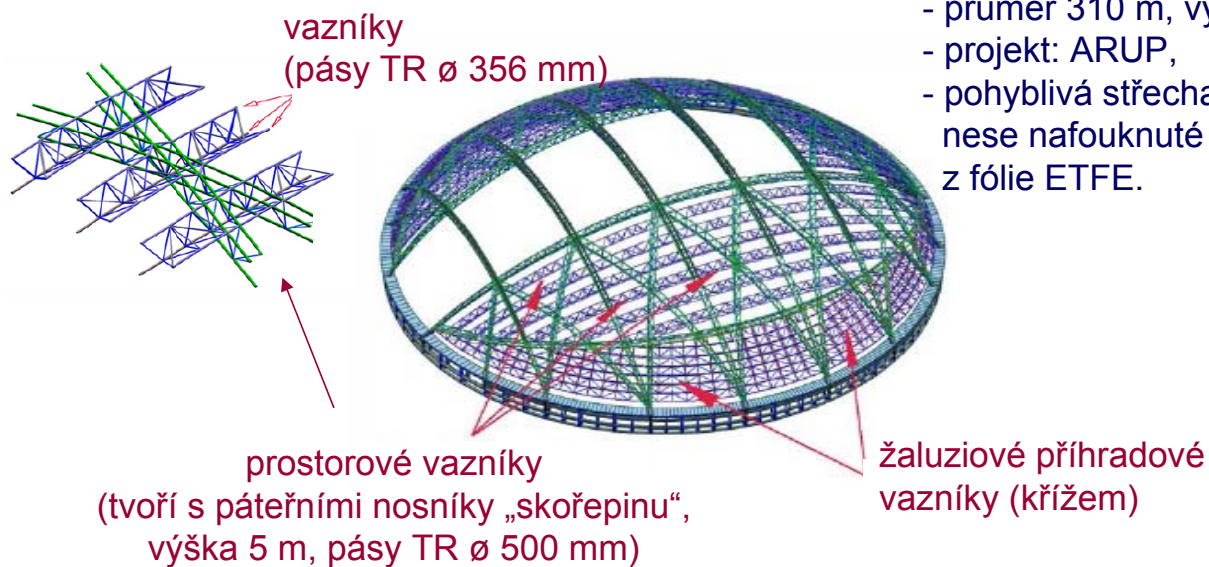
NNK – ocelové konstrukce (1)

15

Národní stadion v Singapuru

Rok 2014

- 55 000 sedících diváků,
- průměr 310 m, výška 85 m,
- projekt: ARUP,
- pohyblivá střecha (220x82 m), nese nafouknuté polštáře z fólie ETFE.



NNK – ocelové konstrukce (1)

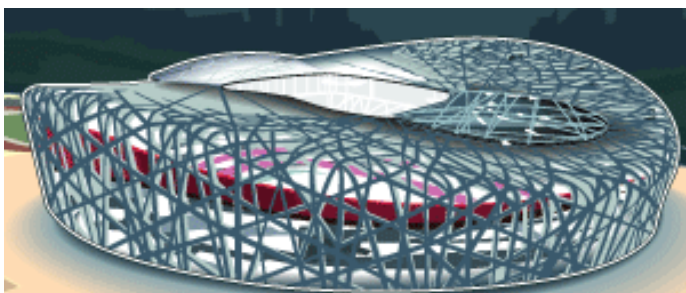
16



Ptačí hnízdo (Peking)
Beijing National Museum
(Bird's nest)

Rok: 2008
(pro 91000 diváků)

- rozměry 332,3 × 296,4 m,
- výška až 42,8 až 68,5 m,
- centrální otvor 127,5 × 186,7 m,
- uzavřené profily 1,2 × 1,2 m,
- tloušťka plechů 20 mm,
- hmotnost oceli je 41,8 Mt
- povrch z polštářů z membrány
ETFE (ethylen-tetra-fluor-ethylen)



NNK – ocelové konstrukce (1)

17



0₂ (VB)

(dříve Millennium dome,
dnešní vlastník AEG)

Rok: 1999

- rozpětí 320 m, výška až 48 m,
- středový prstenec,
- 72 radiál. předepnutých lan,
- pylony na gumových
hrncových ložiskách (jeden se
může zřítit),
- membrána: skelná tkanina + PTFE
(polytetrafluoretylen = teflon).

NNK – ocelové konstrukce (1)

18



Aréna SAZKA

Rok: 2004

18 000 diváků

- průměr 135 m, výška 9 m
- 36 vzpínadlových vazníků
s táhlem $\varnothing 98$ mm (S460)
- středový tubus $\varnothing 18$ m
vážící 170 t, lze + 30 t

NNK – ocelové konstrukce (1)

19



Centrální tankoviště ropy Nelahozeves

Rok: 2003

4 x 125 000 m³

- Ø 85 m, výška 24 m, 8 lubů

- t = 39 ÷ 11 mm



NNK – ocelové konstrukce (1)

20

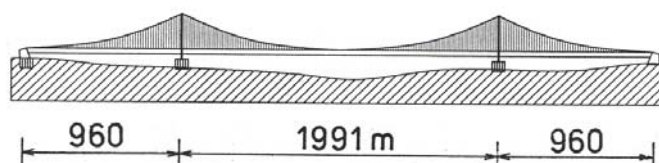
Mosty - největší rozpětí (stav 2/2019)

Visuté

1. Akashi-Kaikyo Bridge (JAP)	1991 m	(1998)
2. Xihoumen Bridge (Čína)	1650 m	(2009)
3. Great Belt Bridge (Dánsko)	1624 m	(1998)

Zavěšené

1. Ruský most (Rusky Bridge)	1104 m	(2012)
2. Sutong Bridge (Čína)	1088 m	(2008)
3. Stonecutters Bridge (Čína HK)	1018 m	(2009)



Ocelové pylony výšky 283 m, lana o průměru 1120 mm,
(každé ze 36 830 paralelních drátů Ø 5 mm)

NNK – ocelové konstrukce (1)

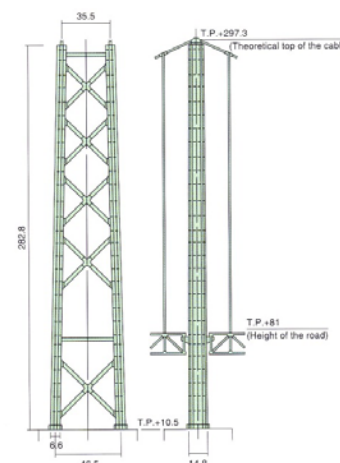
Visuté:

1. Akashi-Kaikyo bridge (Perlový most)

Spojuje ostrovy Honšú a Šikoku
projekt: Honshu Shikoku Bridge Authority

Rok: 1998

Rozpětí:
960+1991+960 [m]





2. Xihoumen Bridge

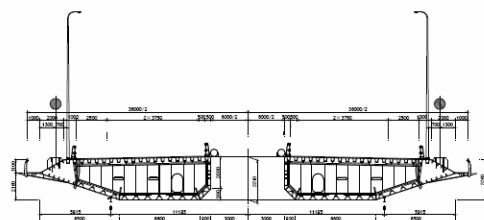
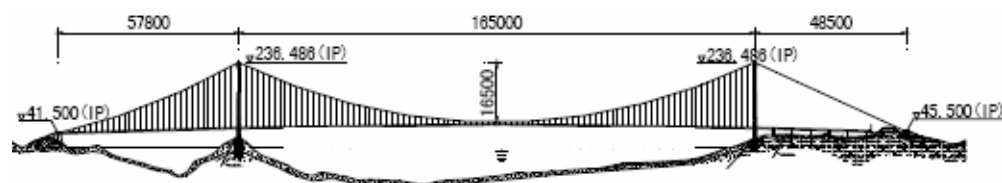
Spojuje ostrovy Jintang a Cezi jižně od Šanghaje

Rok: 2009

Rozpětí:

578+1650+475 [m]

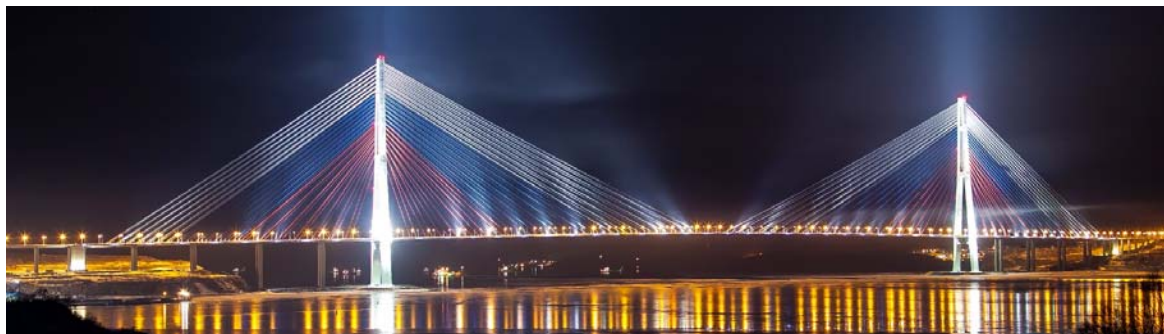
Pylony: žel. bet., 211 m



Hlavní kabel Ø 855 mm: paralelní dráty Ø 5,25 mm
(169 svazků, pevnost drátů 1770 MPa).
Výztužný nosník: spojené 2 komory (z důvodů kmitání).
Mostovka: ortotropní, $t = 14$ mm, korýtkové výztuhy.

NNK – ocelové konstrukce (1)

23



Zavěšené:



1. Ruský most

přes Východní Bosporskou úžinu u Vladivostoku,
teploty až $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Rok: 2012 Rozpětí: 1104 m
(60+72+3x84+1104+3x84+72+60 m)

Ocelový výztužný komorový nosník.

Ortotropní mostovka šířky 29,5 m,

Ž.b. pylony tvaru A s výškou 321 m

(založeny na 120 pilotách délky 77 m)

168 kabelů z 13 až 79 pramenů o $\varnothing 15,7\text{ mm}$
(každý ze 7 pozink. drátů).

NNK – ocelové konstrukce (1)

24

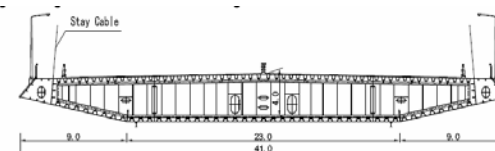
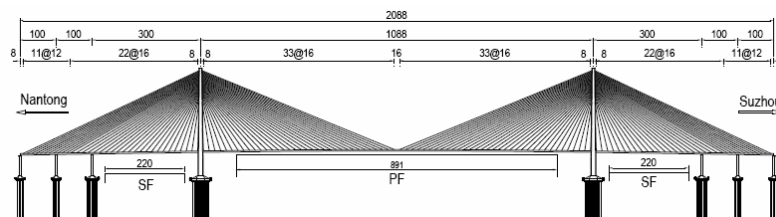


2. Sutong bridge

přes Dlouhou řeku (Yangtze River)
 Projekt: Architectural Design & Research
 Institute of Tongji University,
 China Highway P+D Institute Consultants,
 Jiangsu Province Communications
 Planning and Design Institute

Rok: 2008

Rozpětí: 1088 m
(2.100+300 + 1088 + 300+2.100)



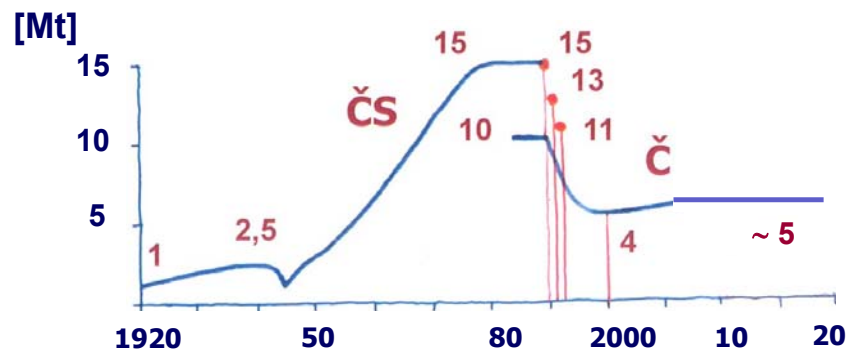
Ž.b. pylony tvaru obráceného Y, výška 304 m (beton C50, nahoře trny přichycena 36 t ocelová komora pro ukotvení závěsů).

Ocelová komora 40 x 4 (m) z oceli S345 a S370, ortotropní mostovka,
 Lana ze 139-313 paralelních drátů Ø 7 mm (1770 MPa), polovějřový tvar, s tlumiči.

NNK – ocelové konstrukce (1)

25

Výroba oceli



Roční produkce (Σ 2018 / Σ 2000) ocel [Mt]

Čína + Taiwan

951/126

Indie

106/ 27

Japonsko

104/106

USA

87/101

Rusko

72/ 58

Jižní Korea (72), Německo (42), Turecko (37), Brazílie (34), Itálie (24) ...

:

ČR (24. místo)

5/4

4

surové železo 2018 [Mt]

786

71

77

24

51

Výrobci: 1. Arcelor Mittal, Lucembursko (97); 2. China Baowu Group (65); 3. NSSMC Group, Japonsko (47); 4. HBIS Group, Čína (45); 5. POSCO, J. Korea (42) ...

NNK – ocelové konstrukce (1)

26

Užití oceli

ČR:	strojírenství (55 %) + export (30 %)	85 %
	beton. výztuž	10 %
	OK (~ 350 kt/rok)	5 %

Původní EU, Japonsko:

	beton. výztuž	3 %
	OK	6 %

Uplatnění OK ve světě:

Vícepodlažní budovy

	Japonsko, V.B., Švédsko	60 %
	USA	50 %
	Západní Evropa (původní EU)	< 30 %

Haly

	Japonsko, V.B., Švédsko, Francie, Španělsko	90 %
--	---	------

OK ve stavebnictví ČR

75 % pozemní stavby

- **skelety budov** (Debenhaus, Muzeum (RSE), Pankrácké nám.: Motokov, City Tower, Budějovická - spořitelna, DBK, Kongresové centrum, zastřešení Flora, ...)
- **haly** (skladové, výrobní, obchodní: např. Tesco Letňany)
- **sportovní haly a tribuny** (Aréna Sazka, Nikolajka, Výstaviště, Sparta, Slávie, Juliska, ...)
- **pavilony** (Výstaviště, Z pavilon Brno, ...)

5 % mosty

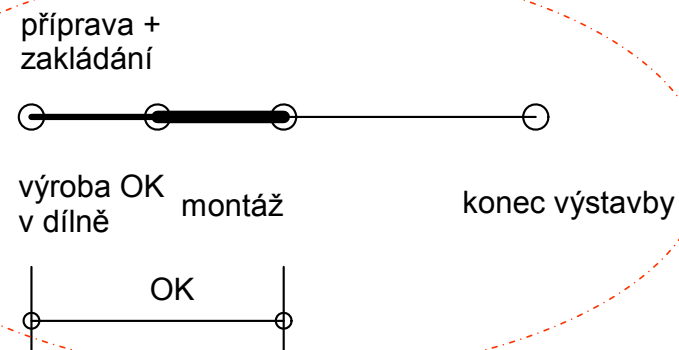
(přes Masarykovo nádraží, metro Lužiny, Trojský most, most Barikádníků, U Bulhara, Lochkov, Suchdol, ...)

20 % speciální stavby

- **stožáry a věže** (Petrín 60 m – 1891, Žižkov TV 216 m – 1989 ...)
- **hutní stavby, energetika** (těžní věže, vysoké pece, kont. Temelín ...)
- **zásobníky, nádrže, plynojemy** (CTR Nelahozeves, ...)
- **vodní stavby** (jezy, zdviže, ...)

Výhody OK

- nejkvalitnější běžné stavivo
- malá hmotnost
- rychlost výstavby →



- návratnost, emise CO₂

Nevýhody OK

- koroze ? (dnes až 50 let pro žárové pozinkování, žárové stříkání Zn a Al)
(dřívější názvy pro žárové stříkání: metalizace, šopování)
- požární odolnost ? (dnes výpočtem: obklady, nástřiky, nátěry)
- cena ? (otázka pro projektanta a výrobce, technologie ...)

Výrobci OK v ČR:

HM Ostrava, MCE Slaný, DT Prostějov, Metrostav, Excon, Skanska CZ, Warex, ...

Ocel

Surové železo z vysoké pece:

- slévárenské (šedé), C jako grafit
- ocelárenské (bílé), obsahuje Fe_3C (více Mn v rudě)

Obsahuje asi 4 % C

Výroba oceli:

Výchozí je: bílé železo + šrot

Oxidací se odstraní přebytek C (tzv. "zkujňováním železa"), aby:

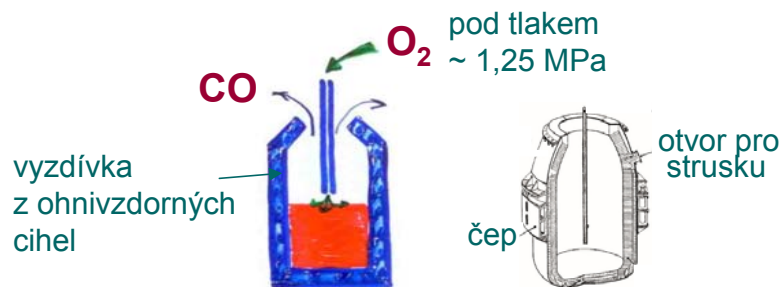
$$\text{C} < 2,1 \%$$

(běžná konstrukční ocel však jen $0,1 \div 0,2 \%$)

Probíhá převážně:

- v kyslíkových konvertorech,
- v elektrických pecích,
- (- dříve též v Siemens-Martinských pecích, v ČR již ne).

Kyslíkové konvertory (převážně: ČR 92 %, svět 65%)



LD proces
(Linzer-Düsenverfahren)
nebo též Linz – Donawitz



Kaldo proces
(prof. Kalling z Domnarvetu)
(zcela výjimečně, pro železo s fosforem, až 2% P)

⇒ tekuté surové železo + šrot (< 40 %), + Ca (tvoří strusku, která se po náklonu vypustí).

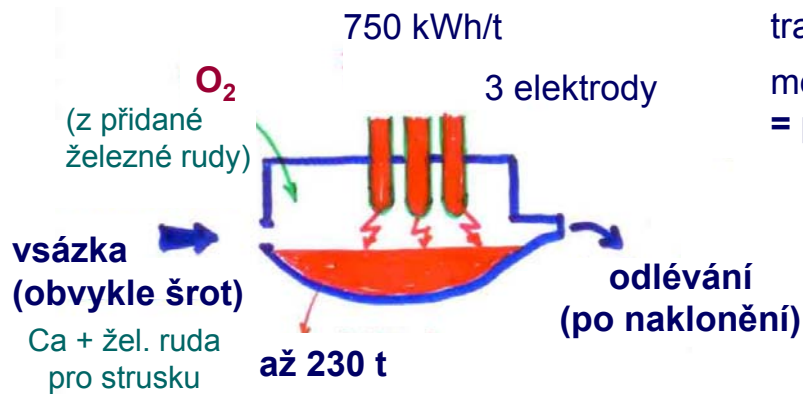
Bez paliva: vhání se O_2 , po oxidaci železa se spaluje Si, Mn, P; zvyšuje se teplota a z reakce vzniká CO (probublává, způsobuje "var").

Obsah: 60-300 t. Do sklopeného konvertoru se naleje surové železo (1200 °C) a narovná svisle. Tryska vhání kyslík k oxidaci na FeO, ten obratem reaguje s příměšovými prvky (Si, Mn, P), nakonec s uhlíkem: $C + FeO \rightarrow Fe + CO$, ke zchlazení se přidává šrot, vápno, poté se dezoxiduje (viz dále) a odlévá při teplotě cca 1650 °C. Tavba trvá asi 30 min. Ocel velmi kvalitní (i legovaná).

NNK – ocelové konstrukce (1)

31

Elektrické pece (ČR 8 %, svět 32%)



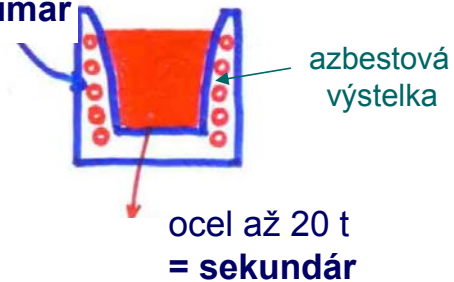
obloukové

(3 grafitové elektrody, až 40 000 A,
střídavý třífázový proud 220÷300V,
oblouk o teplotě 3500 °C,

ke konci procesu se dezoxiduje feromanganem a přidávají legury: Ni, Mo, W, Cr ...)

Zejména pro ušlechtilé oceli (přidávají se legující prvky - legury).

transformátor se vzdušným jádrem:
měděná cívka vodou chlazená
= primár

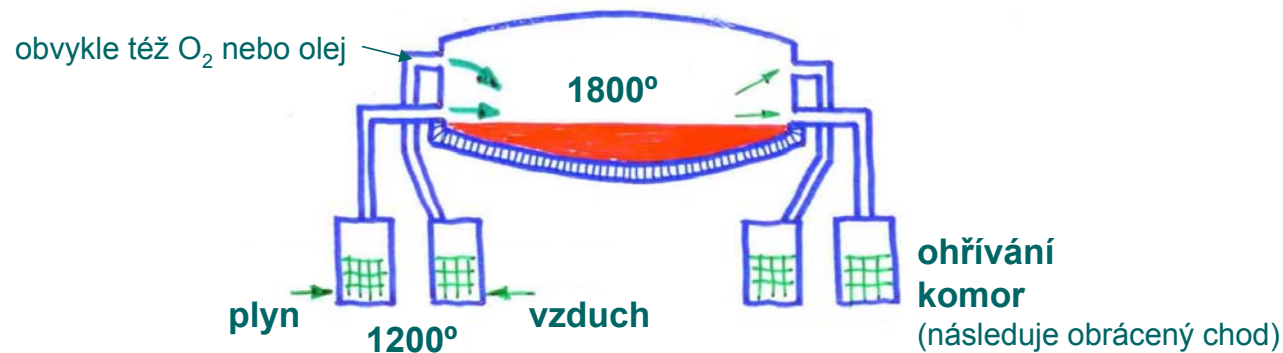


indukční

(vesměs jen pro přetavování- rafinaci)
středofrekvenční pece 500 -10000 Hz

Siemens - Martinské pece - "plamenná pec"

└ němečtí bratři sklářská pec
└ Francouz, pro ocel
(zastaralé: ČR 0 %, svět 2%)



- ⇒ rudný způsob: tekuté surové železo (až 80%), šrot, vápno, ruda.
- ⇒ šrotový způsob: pevné surové železo (až 50 %) a šrot.

Palivo: plyn (olej) + předehřátý vzduch (někdy též kyslík) ⇒ **drahé.**

Okysličením vzniká FeO , roste teplota, reagují příměsové prvky na oxidy tvořící strusku a zejména $C + FeO \rightarrow Fe + CO$. Ke konci se přidá feromangan, (tj. dezoxidace, viz dále). Obsah: až 1000 t, jedna tavba: asi 6 hod. Tandemové pece: střídavé zkujňování a předehřev 2 pecí.

NNK – ocelové konstrukce (1)

33

Dezoxidace oceli

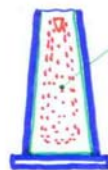
Výroba oceli = oxidační proces (odstranění C).

Vzniklý FeO je nutné odstranit dezoxidací (jinak je ocel křehká).

Provádí se před vyléváním z konvertoru přidáním **dezoxidovadel** (Mn, Si, Al), obvykle ve formě slitin (tj. feromangan, ferosilicium, nebo čistý hliník).

Odlévání oceli: - do kokil $\Rightarrow$ výsledkem je ingot,
- kontilitím $\Rightarrow$ výsledkem jsou bramy.

Odlévání do kokil :



bubliny CO
(„svaží“ se
válcováním)

nástavec
(má žáruvzdorný
obklad)



staženina (lunkr) od smršťování oceli při chladnutí
(a oxidy Mn, Si, Al ...)

řez

neuklidněná ocel: (bez dezoxidovadel, event. trochu Mn)
(pro konstrukce již dnes nelze používat!)

uhlík C samovolně reaguje při poklesu teploty:

$\text{FeO} + \text{C} \Rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$ (část bublin CO uniká, zdání „varu“.

Zůstává 0,2 ÷ 0,3 % O (nevhodné vlastnosti).

uklidněná ocel: (po přidání dezoxidovadel)

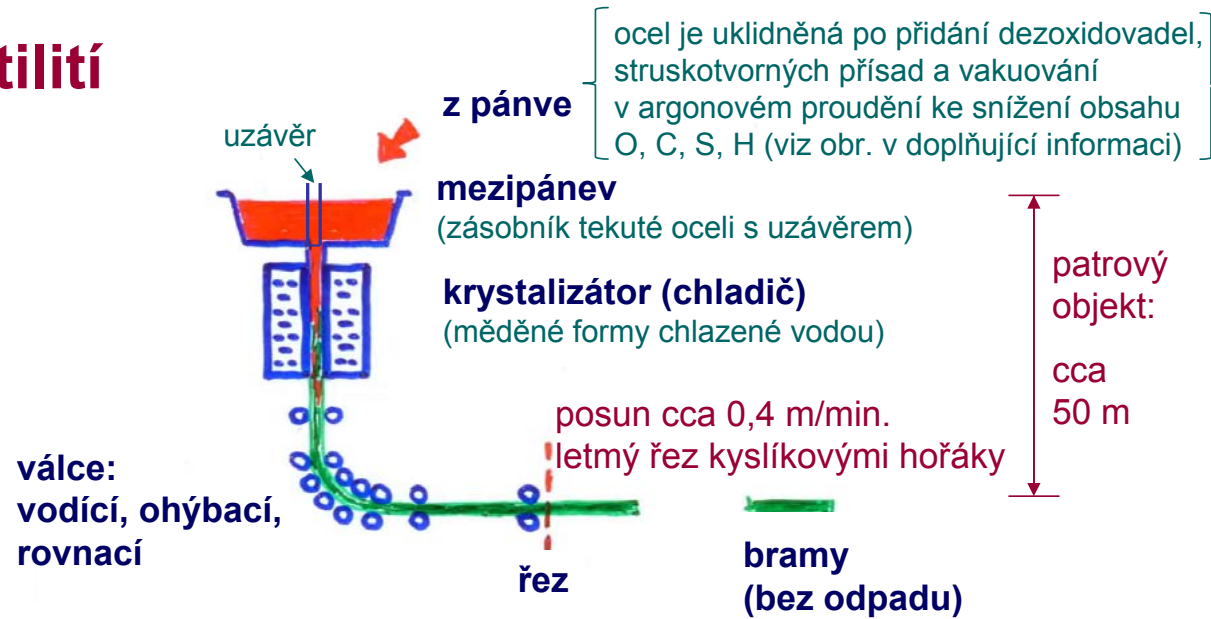
Al (nebo Mn, Si) tvoří oxidy (jsou lehčí, vyplouvají na povrch), odpad odstříhnutím až 20 % (podrobněji viz doplňující info).

Zůstává nepatrně kyslíku, < 0,003 % O.

NNK – ocelové konstrukce (1)

34

Kontilití



Další zpracování oceli:

**Ingoty
(nebo bramy)**



**předehřev
(1250 °C)**



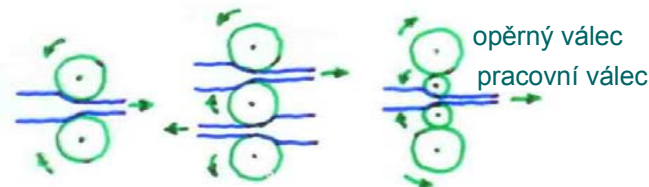
do válcovny

Tváření za tepla

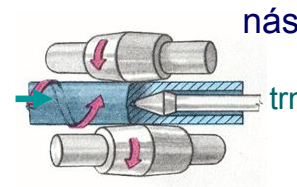
ve válcovně 1200 °C ⇒ 900 °C (nejnižší teplota pro válcování)

"válcovací trať":

- ohřívací zařízení
- dopravní zařízení
- válcovací stolice:



duo, trio, kvarto (i více, až 20 válců)



kosé (na trubky) ⇒ dutý předvalek

následuje: Mannesmanova trať
nebo trať Stiefelova
nebo trať Kellogova

Tratě :

- na předvalky (bramy , bloky , sochory )
- na profily, plechy (sochorové, hotovní ...)

Tváření za studena:

- **válcování** plechy tl. ≤ 4 mm (mezi řadou dvojic válců, po svaření i uzavřené profily),
- **tažení** dráty; duté profily (ze svařované trubky, po hrotování a tažení průvlakem),
- **lisování** tenkostěnné jednodušší profily (na ohraňovacích lisech, do š. 9 m).

Doplňující informace

Výroba oceli a zpracování v Dillinger Hütte (NSR)



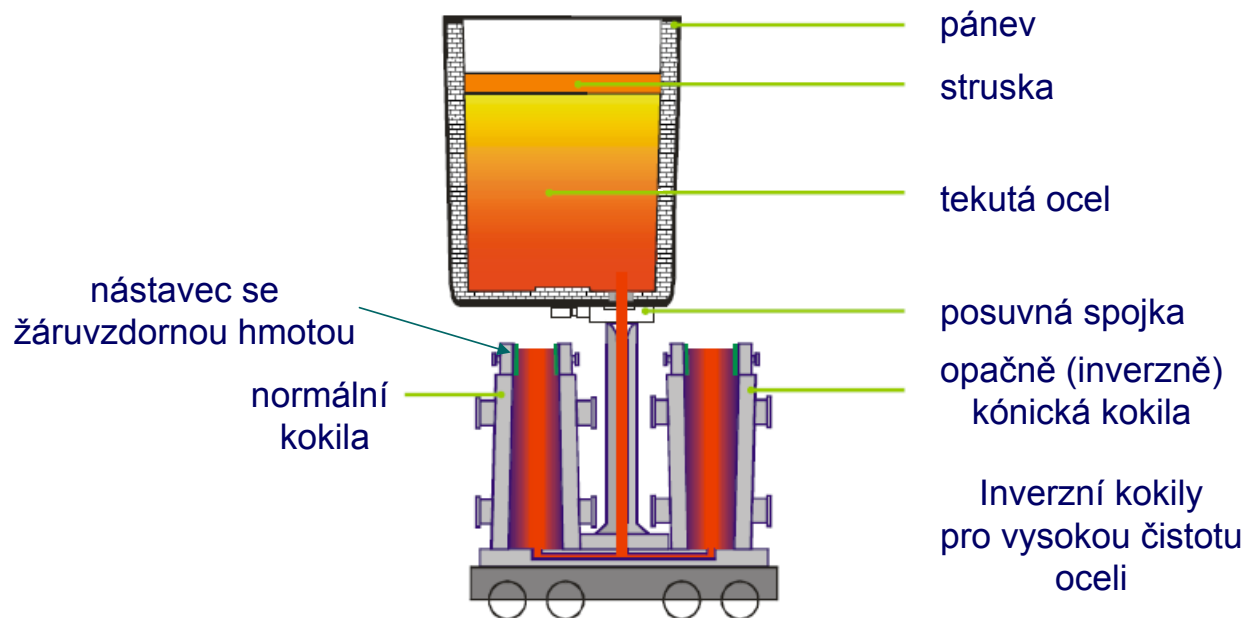
- 1 koksové baterie (z černého uhlí při 1200° C, bez přístupu vzduchu),
- 2 sintrovací závod (spékání rudy, koksu, přísad),
- 3 vysoká pec (surové železo, teplota nad 1500° C),
- 4 odsiřování,
- 5 odstraňování strusky,
- 6 plnění kyslíkového konvertoru,
- 7 zkujňování kyslíkem,
- 8 přidávání legur,
- 9 vakuování,
- 10 kontilití,
- 11 (nebo odlévání do kokil → získávání ingotů),
- 12 válcovací stolice.

NNK – ocelové konstrukce (1)

38

Odlévání do kokil

Kokily jsou z jakostní litiny: Odlévání může probíhat spodem (pro malé ingoty, viz obr.), nebo standardně horem. Pro uklidněnou ocel je nástavec opatřen žáruvzdornou hmotou k pomalému chladnutí ocele. Ocel tuhne od pláště kokily a smršťuje se, na volné místo sestupuje shora tekutá ocel, na uvolněném místě se vytváří lunkr (staženina).



NNK – ocelové konstrukce (1)

39

Stahování (stripování) běžných kokil



NNK – ocelové konstrukce (1)

Stahování (stripování) inverzních kokil



odstranění nástavce



nasazení na podstavec



**vysunutý ingot
pro uchopení jeřábem**

NNK – ocelové konstrukce (1)

41