

## Obsah

Úvod .....	1
Co je korozivzdorná ocel? .....	2
Úspěšné použití .....	4
Třídy korozivzdorné oceli a jejich výběr .....	5
Vlastnosti korozivzdorné oceli .....	6
Zásady navrhování .....	11
Průhyb .....	18
Zvýšení pevnosti průřezů tvářených za studena .....	19
Metoda CSM (Continuous Strength Method) .....	19
Závěr .....	21

## Poznámky k výuce

### Úvod

- 2 Čtvrté vydání této *Příručky* bylo připraveno Nancy Baddoo z The  
3 Steel Construction Institutu ve Velké Británii jako součást projektu  
4 Výzkumného fondu pro uhlí a ocel Evropské komise RFCS *Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels* (PUREST). Český překlad pak autory Jandera, Židlický, Šorf z ČVUT v Praze.

Jedná se o kompletní revizi předchozího třetího vydání (v češtině první); hlavní změny jsou:

- Vztah k textu ke Změně A1 2015 normy EN 1993-1-4.
- Zahnutí feritických tříd korozivzdorných ocelí na základě poznatků získaných z práce na projektu Structural appl. of ferritic stainless steels (SAFSS) (RFSR-CT-2010-00026).
- Přidání nových údajů o tepelných a mechanických vlastnostech korozivzdorných ocelí za požáru.
- Byly aktualizovány návrhové hodnoty, návrhové postupy a odkazy na současné verze Evropských norem zahrnující EN 10088, 1993 a EN 1090.
- Přidání přílohy pro materiálový model.
- Přidání přílohy udávající metodu pro výpočet zvýšených pevnostních charakteristik materiálu vlivem tváření za studena.
- Přidání přílohy obsahující méně konzervativní návrhové postupy vlivem zohlednění výhodného zpevnění materiálu zahrnuté v metodě CSM (Continuous Strength Method).

K dispozici je celkem 15 různých vzorových příkladů. Je v zájmu studentů tyto příklady přepočítat a porovnat výsledky

Komentář prezentuje výsledky různých zkušebních programů, které projektantům poskytují informace, na kterých jsou doporučení návrhu založena.

Již je vyvinuta aplikace pro PC, iOS a Android, která umožňuje uživateli jednoduše stanovit únosnost prutu z korozivzdorné oceli

### Obsah

Cílem této prezentace je poskytnout stručný přehled základních informací o korozivzdorné oceli spolu s (novými) důležitými pravidly návrhu.

Návrhové postupy jsou porovnávány s postupy pro uhlíkovou ocel.

Pro získání detailních informací je možné zdarma Příručku stáhnout z webu.

RFCS Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steel

### Příručka pro navrhování z korozivzdorné oceli



RFCS Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steel

### Obsah

- Co je korozivzdorná ocel?
- Třídy korozivzdorné oceli a jejich výběr
- Vlastnosti korozivzdorné oceli
- Návrhová pravidla
- Zvýšení pevnosti průřezů tvářených za studena
- Metoda CSM (Continuous Strength Method)

RFCS Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steel

v souladu s EN 1993-1-4 a Příručkou. Průřezy mohou být vybrány buď z databáze, nebo uživatel může vložit průřez vlastní.

### Co je korozivzdorná ocel?

- 6 Korozivzdorná ocel je vysoce legovaná ocel s obsahem chromu,  
7 niklu, železa a uhlíku. Procentuální zastoupení podílu chromu se  
8 pohybuje mezi 10,5 a 30 %. Rozeznáváme čtyři základní typy korozivzdorných ocelí: martenzitickou, feritickou, austenitickou a austeniticko-feritickou (duplexní). Nicméně, ne všechny typy korozivzdorných ocelí jsou vhodné pro stavební účely. Rozdělení skupin oceli je závislé na její mikrostruktura. Chemické složení určuje chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti. Feritické, martenzitické, austenitické a austeniticko-feritické oceli jsou blíže specifikovány níže.

Feritické korozivzdorné oceli jsou druhem, jehož hlavním legujícím prvkem je chrom. Maximální obsah uhlíku je limitován hodnotou 0,1 % a množství chromu leží mezi 10,5 a 18 %. Nikl neobsahují buď vůbec, nebo pouze ve velmi malém množství. Jejich prostorově středěná struktura s kubickou mřížkou je stejná jako u uhlíkové oceli. Jejich cena je nižší a stabilnější než cena austenitických ocelí, avšak mají ekvivalentní odolnost vůči korozi. Obecně vykazují menší tažnost a horší svařitelnost, než austenitické oceli.

Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli jsou oceli legované převážně z chromem a niklem. Obsah niklu se pohybuje mezi 20 a 26 %, nikl má menší zastoupení – mezi 1 a 8 %. Mezi další legury patří: molybden (0,05-5 %) a dusík (0,05-0,3 %). Austeniticko-feritické oceli mají smíšenou mikrostrukturu austenitu a feritu, někdy se také nazývají duplexní oceli.

Austeniticko-feritické oceli jsou velice pevné a mají dobrou odolnost vůči korozi, ale hůře se tvářejí. Jelikož obsahují menší podíl niklu než austenitické oceli, jejich cena je stabilnější.

Austenitické korozivzdorné oceli, typ ocelí obsahující chrom, nikl a v některých případech molybden. Díky niklu je materiál tvárnější. Obsahují 17 až 18 % chromu a 8 až 11 % niklu. Na rozdíl od uhlíkových ocelí, které mají kubickou mřížku s prostorově středěnou strukturou, austenitické oceli mají kubickou mřížku s plošně středěnou strukturou. Díky tomu mají, kromě odolnosti vůči korozi, vysokou tažnost, snadno se tvářejí za studena a jsou snadno svařitelné.

Martenzitické korozivzdorné oceli mají podobnou prostorově středěnou strukturu, jako oceli feritické a uhlíkové. Avšak díky vyššímu obsahu uhlíku lze jejich pevnost navýšit kromě tváření za studena také tepelným zušlechťováním. Jejich využití ve stavebnictví je značně limitované.

Všechny typy korozivzdorných ocelí mají na svém povrchu samoobnovující se ochranný film, zvaný pasivní vrstva. Tato pasivní vrstva poskytuje lepší odolnost vůči korozi a oxidaci než má uhlíková ocel, která sice také může obsahovat legury, ale obvykle není

#### Co je korozivzdorná ocel?

- Skupina legovaných ocelí odolných korozi obsahující minimálně 10,5% chromu (Cr)
- Další legující prvky:
  - nikl (Ni)
  - mangan (Mn)
  - molybden (Mo)
  - vanad (V)
  - dusík (N)
  - kobalt (Co)
  - křemík (Si)

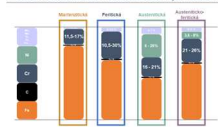
#### Co je korozivzdorná ocel?

- Austenitická
- Austeniticko-feritická (Duplexní)
- Feritická
- Martenzitická

Pro kombinaci účelů se využívají tři typy korozivzdorných ocelí: austenitická, austeniticko-feritická a feritická

Typ	Chemická	Fyzikální	Mechanická	Svařitelnost	Stabilita
Austenitická	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Austeniticko-feritická	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Feritická	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●

#### Chemické složení korozivzdorných ocelí



korozivzdorná. Obsah uhlíku se pohybuje v rozmezí 0,12 až 2 %, což je mnohem méně, než u uhlíkové oceli.

- 9 Korozivzdorné oceli se ve stavebnictví používají již přes sto let, prakticky od doby jejich vynalezení. Mají vysokou odolnost vůči korozi a jsou ideální pro použití v místech, kde je obtížné provádět kontrolu a údržbu. Odolnost vůči korozi je způsobena přirozené tvorbě pasivní povrchové vrstvy.

Jsou k dispozici s různými povrchovými úpravami. Korozivzdorné oceli lze vyrábět pomocí řady technologických postupů a po skončení jejich životnosti jsou plně recyklovatelné. Dosahují vysokých pevností, mají dobrou houževnatost a odolnost proti únavovému namáhání.

Korozivzdorné oceli jsou jednoduše omyvatelné a čistitelné, proto jsou zřejmou volbou pro potravinářský a nápojový průmysl a pro stravovací vybavení. Neexistují žádná prokázaná zdravotní rizika plynoucí z běžného používání korozivzdorných ocelí.

Austenitické oceli nejsou magnetické, avšak v důsledku tváření za studena mohou vykazovat některé magnetické vlastnosti.

Proč používat korozivzdornou ocel?

- Odolnost vůči korozi a dlouhá životnost
- Obtížná údržba a kontrola
- Estetický vzhled
- Hygienický materiál
- Neje magnetická
- Dobrá houževnatost při velmi nízkých teplotách

PODKLADY PRO STUDENTY PUREST

- 10 Při kombinaci obsahu chromu nad 10,5 %, čistého povrchu a jeho vystavení vzduchu, či jinému oxidačnímu vlivu, vzniká na povrchu korozivzdorné oceli průsvitný a pevně přilnutý film oxidu chromitého. Pokud se ochranný film poškodí, například vrypem, dojde díky přítomnosti kyslíku k jeho okamžitému znovuoobnovení. Přestože je film velmi tenký, přibližně do  $5 \times 10^{-6}$  mm, je jak stabilní, tak neporézní. Dokud je korozivzdorná ocel dostatečně odolná proti danému koroznímu prostředí, nebude s atmosférou dále reagovat. Proto se tento film nazývá pasivní vrstvou. Stabilita této pasivní vrstvy závisí na složení korozivzdorné oceli, její povrchové úpravě a korozním vlivům, kterým je vystavena. Lze ji zvýšit vyšším obsahem chromu a přidáním přísad legování molybdenu a dusíku.

Pasivní vrstva

Přirozená tvorba pasivní vrstvy je klíčovým faktorem odolnosti vůči korozi korozivzdorných ocelí.

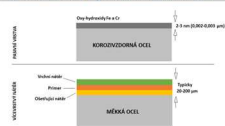
Vlastnosti pasivní vrstvy:

- Oxid bohatý na chrom
- Velice tenká - 20-30 Angströms (2-3 nm)
- Extrémně přilnavá
- Pasivní
- Regeneruje (v řádech minut)

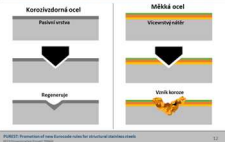
PODKLADY PRO STUDENTY PUREST

- 11 Pasivní vrstva je výrazně tenčí (běžně 2-3 nm, tj. 0.002-0.003  $\mu$ m) než vícevrstvý nátěrový systém (20-200  $\mu$ m). V případě narušení pasivní vrstvy (například vrypem), se vrstva sama obnovuje. Poškození nátěru vede ke vzniku koroze v dané oblasti. Viz ilustrační obrázky vpravo.

Pasivní vrstva v porovnání s Nátěrem



Pasivní vrstva v porovnání s Nátěrem

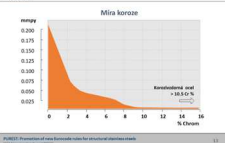


- 13 Korozní úbytek (mmpy = milimetr za rok) je vynesena na ose y a procentuální obsah chromu na ose x. Je zřejmé, že při obsahu chromu větším než 10,5 % je korozní úbytek téměř nulový.

Existuje vůbec možnost, že korozivzdorná ocel zkoroduje, nebo dojde ke skvrnám na povrchu?

Ano, existuje. V případě, že je pro dané prostředí chybně zvolena třída korozivzdorné oceli, nebo pokud je ocel vystavena

Vliv obsahu chromu na odolnost vůči atmosférické korozi



PODKLADY PRO STUDENTY PUREST

neočekávaným vlivům, či ocel není pravidelně čištěna, mohou být některé třídy korozivzdorné oceli náchylné ke vzniku lokální koroze. Nicméně, ve většině běžných prostředí je korozivzdorná ocel vůči korozi dostatečně odolná. Přesto může na základě obsahu legur a provozním prostředí ke vzniku lokální koroze dojít. Rozeznáváme následující druhy koroze:

- **Celková (plošná):** nevyskytuje se v přírodním prostředí, ani slitinách používaných ve stavebnictví.
- **Zbarvení:** Může nastat u méně legovaných slitin v široké škále prostředí. Jedná se pouze o estetickou vadu, nemá vliv na únosnost.
- **Bodová:** Riziko vzniku koroze stoupá s rychlostí usazování chloridů a s klesajícím obsahem legur. Jedná se pouze estetickou vadu, která většinou nemá vliv na únosnost.
- **Štěrbínová:** Riziko vzniku koroze stoupá s rychlostí usazování chloridů a s klesajícím obsahem legur. Vyžaduje velmi úzké štěrbinu (<0,25 mm) a dlouhodobou přítomnost vlhkosti. Potenciálně závažná.
- **Korozní praskavost:** Kombinace působení tahového napětí, chloridů a koroze. Výše rizika vzniku závisí také na teplotě. Běžné méně legované austenitické oceli jsou nejnáchylnější. Potenciálně závažná, může vézt ke kolapsu.
- **Bimetalická (galvanická):** Je obvykle problém pro ostatní kovy: uhlíková ocel, zinek a hliník korodují mnohem dříve než korozivzdorná ocel. Uhlíková ocel je obvykle opatřena nátěrovým systémem, což řeší problém.
- **Kontaminace povrchu:** Nečistoty ovlivňující pasivní vrstvu.
- **Zbarvení tepelným ovlivněním (svařováním):** Je zesílení přirozené průhledné pasivní vrstvy. Často patrné v tepelně ovlivněných oblastech svaru. Při vzniku zbarvení je chrom přitahován k povrchu materiálu (oxidy chromu jsou ve srovnání s železem lehčí). Tím vzniká oblast se sníženou odolností vůči korozi.

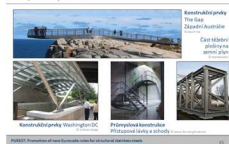
Je proto důležité, aby množství legur odpovídalo provoznímu prostředí.

### Vhodné použití

15 Z finančního hlediska

- 16
- 17
- Cena korozivzdorné oceli je vyšší než u uhlíkové oceli.
  - Cena korozivzdorné oceli je také méně stabilní, protože závisí na aktuální a velmi nestabilní ceně niklu.
  - Měly by být brány v potaz náklady nutné pro celou životnost konstrukce, protože konstrukce z korozivzdorné oceli vyžadují výrazně menší údržbu v průběhu životnosti. Analýzy nákladů na životní cyklus prokázaly, že v mnoha případech může být korozivzdorná ocel nejlevnější volbou, v porovnání s materiály vyžadující častou údržbu.

Úspěšné použití



Úspěšné použití

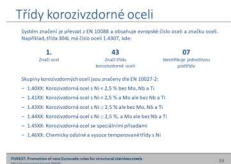




## Třídy korozivzdorné oceli a jejich výběr

19 Cvičení: Pokuste se zjistit název druhu oceli u následujících tříd:

- 1.4301
- 1.4162
- 1.4016



20 Příloha A normy EN 1993-1-4 udává postup pro výběr příslušných  
21 tříd austenitických a austeniticko-feritických ocelí pro jejich použití  
22 v daném prostředí. Tento postup je platný pouze pro Evropu.  
Postup nezohledňuje:

- 23 ▪ Dostupnost výrobku/třídy oceli,
- 24 ▪ Požadavky na povrchovou úpravu, např. s ohledem na architektonické či hygienické důvody,
- 25 ▪ Způsoby spojení/připojení.

Postup předpokládá splnění následujících podmínek:

- Provozní prostředí bude blízké neutrálnímu rozsahu pH (pH 4 až 10),
- Konstrukční části nejsou přímo vystaveny, ani nejsou součástí, chemické reakce,
- Provozní prostředí není trvale nebo často zaplaveno mořskou vodou.

Pokud nejsou tyto podmínky splněny, je třeba výběr konzultovat se specialisty.

Postup zahrnuje následující kroky:

- Stanovení součinitele korozní odolnosti CRF (Corrosion Resistance Factor) pro dané prostředí (tabulka 3.3);
- Stanovení třídy korozní odolnosti CRC (Corrosion Resistance Class) na základě CRF (tabulka 3.4).

Součinitel CRF závisí na nepříznivosti prostředí a je vypočten jako:

$$CRF = F_1 + F_2 + F_3$$

kde:

- $F_1$  = Riziko vystavení chloridům ze slané vody nebo rozmrazovacím solím
- $F_2$  = Riziko vystavení oxidu siřičitému
- $F_3$  = Režim čištění nebo vystavení oplachu deštěm

Viz tabulka 3.3 Příručky, nebo slide 16.

Po stanovení součinitele CRF se na základě tabulky 3.4 Příručky, nebo slidu 17 má stanovit třída korozní odolnosti (CRC).



Na základě znalosti třídy korozní odolnosti (CRC) je již možné stanovit potřebnou třídu korozivzdorné oceli pro dané použití, a to pomocí tabulky 3.5 Příručky, nebo slidu 17.

V případě prostředí bazénů, viz kapitola 3.5.3 Příručky.

Postup pro stanovení vhodné třídy feritické oceli, viz kapitola 3.5.4 Příručky.

Slide 17.

Základní feritické
Základní austenitické
Mo austenitické
Nizkolegované austeniticko-feritické
Více legované/ super austenitické
Austeniticko-feritické /super austeniticko-feritické

Více legování, tj. více odolné vůči korozi →

Třída korozní odolnosti (CRC)				
I	II	III	IV	V
1.4003	1.4301	1.4401	1.4439	1.4565
1.4016	1.4307	1.4404	1.4539	1.4529
1.4512	1.4311	1.4435	1.4462	1.4547
	1.4541	1.4571		1.4410
	1.4318	1.4429		1.4501
	1.4306	1.4432		1.4507
	1.4567	1.4578		
	1.4482	1.4662		
		1.4362		
		1.4062		
		1.4162		

POZNÁMKA 1: Třídy korozní odolnosti jsou určeny pouze k použití spolu s uvedeným postupem výběru materiálu a vztahují se pouze na použití v konstrukcích.  
POZNÁMKA 2: Lze použít i ocel vyšší třídy korozní odolnosti než odpovídá stanovenému CRF.

## Vlastnosti korozivzdorné oceli

### 27 Pevnost

28 Při návrhu konstrukce se charakteristická hodnota meze kluzu  $f_y$  a charakteristická hodnota meze pevnosti  $f_u$  považují za minimální smluvní hodnoty napětí při 0,2 % plastické deformace ( $R_{p0,2}$ ) a minimální napětí na mezi pevnosti ( $R_m$ ) uvedené v normě EN 10088 části 4 a 5 (viz tabulka 2.2 Příručky). Tyto hodnoty se vztahují na materiál v žíhaném stavu, a proto jsou pro materiál nebo jeho části, které byly během výroby zpracovány za studena, konzervativní. Konstrukční prvky jsou v žíhaném stavu dodávány pouze zřídka.

### Modul pružnosti

Pro konstrukční návrh se doporučuje uvažovat hodnotu  $E = 200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> pro všechny třídy korozivzdorných ocelí.

Hodnota pro uhlíkovou ocel je  $E = 210 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup>.

**POZNÁMKA:** Normy EN 1993-1-4 a EN 10088-1 udávají  $200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> jako hodnotu modulu pružnosti pro všechny standardní austenitické a austeniticko-feritické oceli využívané ve stavebnictví. Pro feritické oceli udávají hodnotu  $220 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup>. Dostupné experimentální údaje však ukazují, že hodnota  $200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> je přesnější, a proto se očekává, že v příštím vydání normy EN 1993-1-4 bude pro navrhování doporučena tato hodnota.

#### Mechanické vlastnosti

Prostředí

Prostředí: Pro austenitické a austeniticko-feritické oceli:  $f_y$  a  $f_u$  charakteristická hodnota meze pevnosti a  $R_{p0,2}$  charakteristická hodnota meze kluzu při 0,2 % plastické deformaci ( $R_{p0,2}$ ) a  $R_m$  charakteristická hodnota meze pevnosti ( $R_m$ ) uvedené v normě EN 10088-1 a 5 v závislosti na třídě.

Pro feritické oceli:  $f_y$  a  $f_u$  charakteristická hodnota meze pevnosti a  $R_{p0,2}$  charakteristická hodnota meze kluzu při 0,2 % plastické deformaci ( $R_{p0,2}$ ) a  $R_m$  charakteristická hodnota meze pevnosti ( $R_m$ ) uvedené v normě EN 10088-1 a 5 v závislosti na třídě.

Modul pružnosti

Pro austenitické a austeniticko-feritické oceli:  $E = 200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> pro feritické oceli:  $E = 210 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup>

Další parametry

Pro austenitické a austeniticko-feritické oceli:  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  uvedené v normě EN 10088-1 a 5 v závislosti na třídě.

#### Minimální mechanické vlastnosti

Typ třídy	Meze kluzu / N/mm <sup>2</sup>	Meze pevnosti / N/mm <sup>2</sup>	Modul pružnosti / N/mm <sup>2</sup>
Austenitické oceli 1.4301 & 1.4307 1.4306 & 1.4308	250 - 280	48	200 000
Austeniticko-feritické oceli 1.4003, 1.4016, 1.4017, 1.4018 1.4019, 1.4020, 1.4021, 1.4022 1.4023, 1.4024, 1.4025, 1.4026, 1.4027, 1.4028, 1.4029, 1.4030, 1.4031, 1.4032, 1.4033, 1.4034, 1.4035, 1.4036, 1.4037, 1.4038, 1.4039, 1.4040, 1.4041, 1.4042, 1.4043, 1.4044, 1.4045, 1.4046, 1.4047, 1.4048, 1.4049, 1.4050, 1.4051, 1.4052, 1.4053, 1.4054, 1.4055, 1.4056, 1.4057, 1.4058, 1.4059, 1.4060, 1.4061, 1.4062, 1.4063, 1.4064, 1.4065, 1.4066, 1.4067, 1.4068, 1.4069, 1.4070, 1.4071, 1.4072, 1.4073, 1.4074, 1.4075, 1.4076, 1.4077, 1.4078, 1.4079, 1.4080, 1.4081, 1.4082, 1.4083, 1.4084, 1.4085, 1.4086, 1.4087, 1.4088, 1.4089, 1.4090, 1.4091, 1.4092, 1.4093, 1.4094, 1.4095, 1.4096, 1.4097, 1.4098, 1.4099, 1.4100, 1.4101, 1.4102, 1.4103, 1.4104, 1.4105, 1.4106, 1.4107, 1.4108, 1.4109, 1.4110, 1.4111, 1.4112, 1.4113, 1.4114, 1.4115, 1.4116, 1.4117, 1.4118, 1.4119, 1.4120, 1.4121, 1.4122, 1.4123, 1.4124, 1.4125, 1.4126, 1.4127, 1.4128, 1.4129, 1.4130, 1.4131, 1.4132, 1.4133, 1.4134, 1.4135, 1.4136, 1.4137, 1.4138, 1.4139, 1.4140, 1.4141, 1.4142, 1.4143, 1.4144, 1.4145, 1.4146, 1.4147, 1.4148, 1.4149, 1.4150, 1.4151, 1.4152, 1.4153, 1.4154, 1.4155, 1.4156, 1.4157, 1.4158, 1.4159, 1.4160, 1.4161, 1.4162, 1.4163, 1.4164, 1.4165, 1.4166, 1.4167, 1.4168, 1.4169, 1.4170, 1.4171, 1.4172, 1.4173, 1.4174, 1.4175, 1.4176, 1.4177, 1.4178, 1.4179, 1.4180, 1.4181, 1.4182, 1.4183, 1.4184, 1.4185, 1.4186, 1.4187, 1.4188, 1.4189, 1.4190, 1.4191, 1.4192, 1.4193, 1.4194, 1.4195, 1.4196, 1.4197, 1.4198, 1.4199, 1.4200, 1.4201, 1.4202, 1.4203, 1.4204, 1.4205, 1.4206, 1.4207, 1.4208, 1.4209, 1.4210, 1.4211, 1.4212, 1.4213, 1.4214, 1.4215, 1.4216, 1.4217, 1.4218, 1.4219, 1.4220, 1.4221, 1.4222, 1.4223, 1.4224, 1.4225, 1.4226, 1.4227, 1.4228, 1.4229, 1.4230, 1.4231, 1.4232, 1.4233, 1.4234, 1.4235, 1.4236, 1.4237, 1.4238, 1.4239, 1.4240, 1.4241, 1.4242, 1.4243, 1.4244, 1.4245, 1.4246, 1.4247, 1.4248, 1.4249, 1.4250, 1.4251, 1.4252, 1.4253, 1.4254, 1.4255, 1.4256, 1.4257, 1.4258, 1.4259, 1.4260, 1.4261, 1.4262, 1.4263, 1.4264, 1.4265, 1.4266, 1.4267, 1.4268, 1.4269, 1.4270, 1.4271, 1.4272, 1.4273, 1.4274, 1.4275, 1.4276, 1.4277, 1.4278, 1.4279, 1.4280, 1.4281, 1.4282, 1.4283, 1.4284, 1.4285, 1.4286, 1.4287, 1.4288, 1.4289, 1.4290, 1.4291, 1.4292, 1.4293, 1.4294, 1.4295, 1.4296, 1.4297, 1.4298, 1.4299, 1.4300, 1.4301, 1.4302, 1.4303, 1.4304, 1.4305, 1.4306, 1.4307, 1.4308, 1.4309, 1.4310, 1.4311, 1.4312, 1.4313, 1.4314, 1.4315, 1.4316, 1.4317, 1.4318, 1.4319, 1.4320, 1.4321, 1.4322, 1.4323, 1.4324, 1.4325, 1.4326, 1.4327, 1.4328, 1.4329, 1.4330, 1.4331, 1.4332, 1.4333, 1.4334, 1.4335, 1.4336, 1.4337, 1.4338, 1.4339, 1.4340, 1.4341, 1.4342, 1.4343, 1.4344, 1.4345, 1.4346, 1.4347, 1.4348, 1.4349, 1.4350, 1.4351, 1.4352, 1.4353, 1.4354, 1.4355, 1.4356, 1.4357, 1.4358, 1.4359, 1.4360, 1.4361, 1.4362, 1.4363, 1.4364, 1.4365, 1.4366, 1.4367, 1.4368, 1.4369, 1.4370, 1.4371, 1.4372, 1.4373, 1.4374, 1.4375, 1.4376, 1.4377, 1.4378, 1.4379, 1.4380, 1.4381, 1.4382, 1.4383, 1.4384, 1.4385, 1.4386, 1.4387, 1.4388, 1.4389, 1.4390, 1.4391, 1.4392, 1.4393, 1.4394, 1.4395, 1.4396, 1.4397, 1.4398, 1.4399, 1.4400, 1.4401, 1.4402, 1.4403, 1.4404, 1.4405, 1.4406, 1.4407, 1.4408, 1.4409, 1.4410, 1.4411, 1.4412, 1.4413, 1.4414, 1.4415, 1.4416, 1.4417, 1.4418, 1.4419, 1.4420, 1.4421, 1.4422, 1.4423, 1.4424, 1.4425, 1.4426, 1.4427, 1.4428, 1.4429, 1.4430, 1.4431, 1.4432, 1.4433, 1.4434, 1.4435, 1.4436, 1.4437, 1.4438, 1.4439, 1.4440, 1.4441, 1.4442, 1.4443, 1.4444, 1.4445, 1.4446, 1.4447, 1.4448, 1.4449, 1.4450, 1.4451, 1.4452, 1.4453, 1.4454, 1.4455, 1.4456, 1.4457, 1.4458, 1.4459, 1.4460, 1.4461, 1.4462, 1.4463, 1.4464, 1.4465, 1.4466, 1.4467, 1.4468, 1.4469, 1.4470, 1.4471, 1.4472, 1.4473, 1.4474, 1.4475, 1.4476, 1.4477, 1.4478, 1.4479, 1.4480, 1.4481, 1.4482, 1.4483, 1.4484, 1.4485, 1.4486, 1.4487, 1.4488, 1.4489, 1.4490, 1.4491, 1.4492, 1.4493, 1.4494, 1.4495, 1.4496, 1.4497, 1.4498, 1.4499, 1.4500, 1.4501, 1.4502, 1.4503, 1.4504, 1.4505, 1.4506, 1.4507, 1.4508, 1.4509, 1.4510, 1.4511, 1.4512, 1.4513, 1.4514, 1.4515, 1.4516, 1.4517, 1.4518, 1.4519, 1.4520, 1.4521, 1.4522, 1.4523, 1.4524, 1.4525, 1.4526, 1.4527, 1.4528, 1.4529, 1.4530, 1.4531, 1.4532, 1.4533, 1.4534, 1.4535, 1.4536, 1.4537, 1.4538, 1.4539, 1.4540, 1.4541, 1.4542, 1.4543, 1.4544, 1.4545, 1.4546, 1.4547, 1.4548, 1.4549, 1.4550, 1.4551, 1.4552, 1.4553, 1.4554, 1.4555, 1.4556, 1.4557, 1.4558, 1.4559, 1.4560, 1.4561, 1.4562, 1.4563, 1.4564, 1.4565, 1.4566, 1.4567, 1.4568, 1.4569, 1.4570, 1.4571, 1.4572, 1.4573, 1.4574, 1.4575, 1.4576, 1.4577, 1.4578, 1.4579, 1.4580, 1.4581, 1.4582, 1.4583, 1.4584, 1.4585, 1.4586, 1.4587, 1.4588, 1.4589, 1.4590, 1.4591, 1.4592, 1.4593, 1.4594, 1.4595, 1.4596, 1.4597, 1.4598, 1.4599, 1.4600, 1.4601, 1.4602, 1.4603, 1.4604, 1.4605, 1.4606, 1.4607, 1.4608, 1.4609, 1.4610, 1.4611, 1.4612, 1.4613, 1.4614, 1.4615, 1.4616, 1.4617, 1.4618, 1.4619, 1.4620, 1.4621, 1.4622, 1.4623, 1.4624, 1.4625, 1.4626, 1.4627, 1.4628, 1.4629, 1.4630, 1.4631, 1.4632, 1.4633, 1.4634, 1.4635, 1.4636, 1.4637, 1.4638, 1.4639, 1.4640, 1.4641, 1.4642, 1.4643, 1.4644, 1.4645, 1.4646, 1.4647, 1.4648, 1.4649, 1.4650, 1.4651, 1.4652, 1.4653, 1.4654, 1.4655, 1.4656, 1.4657, 1.4658, 1.4659, 1.4660, 1.4661, 1.4662, 1.4663, 1.4664, 1.4665, 1.4666, 1.4667, 1.4668, 1.4669, 1.4670, 1.4671, 1.4672, 1.4673, 1.4674, 1.4675, 1.4676, 1.4677, 1.4678, 1.4679, 1.4680, 1.4681, 1.4682, 1.4683, 1.4684, 1.4685, 1.4686, 1.4687, 1.4688, 1.4689, 1.4690, 1.4691, 1.4692, 1.4693, 1.4694, 1.4695, 1.4696, 1.4697, 1.4698, 1.4699, 1.4700, 1.4701, 1.4702, 1.4703, 1.4704, 1.4705, 1.4706, 1.4707, 1.4708, 1.4709, 1.4710, 1.4711, 1.4712, 1.4713, 1.4714, 1.4715, 1.4716, 1.4717, 1.4718, 1.4719, 1.4720, 1.4721, 1.4722, 1.4723, 1.4724, 1.4725, 1.4726, 1.4727, 1.4728, 1.4729, 1.4730, 1.4731, 1.4732, 1.4733, 1.4734, 1.4735, 1.4736, 1.4737, 1.4738, 1.4739, 1.4740, 1.4741, 1.4742, 1.4743, 1.4744, 1.4745, 1.4746, 1.4747, 1.4748, 1.4749, 1.4750, 1.4751, 1.4752, 1.4753, 1.4754, 1.4755, 1.4756, 1.4757, 1.4758, 1.4759, 1.4760, 1.4761, 1.4762, 1.4763, 1.4764, 1.4765, 1.4766, 1.4767, 1.4768, 1.4769, 1.4770, 1.4771, 1.4772, 1.4773, 1.4774, 1.4775, 1.4776, 1.4777, 1.4778, 1.4779, 1.4780, 1.4781, 1.4782, 1.4783, 1.4784, 1.4785, 1.4786, 1.4787, 1.4788, 1.4789, 1.4790, 1.4791, 1.4792, 1.4793, 1.4794, 1.4795, 1.4796, 1.4797, 1.4798, 1.4799, 1.4800, 1.4801, 1.4802, 1.4803, 1.4804, 1.4805, 1.4806, 1.4807, 1.4808, 1.4809, 1.4810, 1.4811, 1.4812, 1.4813, 1.4814, 1.4815, 1.4816, 1.4817, 1.4818, 1.4819, 1.4820, 1.4821, 1.4822, 1.4823, 1.4824, 1.4825, 1.4826, 1.4827, 1.4828, 1.4829, 1.4830, 1.4831, 1.4832, 1.4833, 1.4834, 1.4835, 1.4836, 1.4837, 1.4838, 1.4839, 1.4840, 1.4841, 1.4842, 1.4843, 1.4844, 1.4845, 1.4846, 1.4847, 1.4848, 1.4849, 1.4850, 1.4851, 1.4852, 1.4853, 1.4854, 1.4855, 1.4856, 1.4857, 1.4858, 1.4859, 1.4860, 1.4861, 1.4862, 1.4863, 1.4864, 1.4865, 1.4866, 1.4867, 1.4868, 1.4869, 1.4870, 1.4871, 1.4872, 1.4873, 1.4874, 1.4875, 1.4876, 1.4877, 1.4878, 1.4879, 1.4880, 1.4881, 1.4882, 1.4883, 1.4884, 1.4885, 1.4886, 1.4887, 1.4888, 1.4889, 1.4890, 1.4891, 1.4892, 1.4893, 1.4894, 1.4895, 1.4896, 1.4897, 1.4898, 1.4899, 1.4900, 1.4901, 1.4902, 1.4903, 1.4904, 1.4905, 1.4906, 1.4907, 1.4908, 1.4909, 1.4910, 1.4911, 1.4912, 1.4913, 1.4914, 1.4915, 1.4916, 1.4917, 1.4918, 1.4919, 1.4920, 1.4921, 1.4922, 1.4923, 1.4924, 1.4925, 1.4926, 1.4927, 1.4928, 1.4929, 1.4930, 1.4931, 1.4932, 1.4933, 1.4934, 1.4935, 1.4936, 1.4937, 1.4938, 1.4939, 1.4940, 1.4941, 1.4942, 1.4943, 1.4944, 1.4945, 1.4946, 1.4947, 1.4948, 1.4949, 1.4950, 1.4951, 1.4952, 1.4953, 1.4954, 1.4955, 1.4956, 1.4957, 1.4958, 1.4959, 1.4960, 1.4961, 1.4962, 1.4963, 1.4964, 1.4965, 1.4966, 1.4967, 1.4968, 1.4969, 1.4970, 1.4971, 1.4972, 1.4973, 1.4974, 1.4975, 1.4976, 1.4977, 1.4978, 1.4979, 1.4980, 1.4981, 1.4982, 1.4983, 1.4984, 1.4985, 1.4986, 1.4987, 1.4988, 1.4989, 1.4990, 1.4991, 1.4992, 1.4993, 1.4994, 1.4995, 1.4996, 1.4997, 1.4998, 1.4999, 1.5000			

#### Jmenovité hodnoty mechanických vl.

Typ třídy	Meze kluzu / N/mm <sup>2</sup>	Meze pevnosti / N/mm <sup>2</sup>	Modul pružnosti / N/mm <sup>2</sup>
Austenitické oceli 1.4301 & 1.4307 1.4306 & 1.4308	250 - 280	48	200 000
Austeniticko-feritické oceli 1.4003, 1.4016, 1.4017, 1.4018 1.4019, 1.4020, 1.4021, 1.4022 1.4023, 1.4024, 1.4025, 1.4026, 1.4027, 1.4028, 1.4029, 1.4030, 1.4031, 1.4032, 1.4033, 1.4034, 1.4035, 1.4036, 1.4037, 1.4038, 1.4039, 1.4040, 1.4041, 1.4042, 1.4043, 1.4044, 1.4045, 1.4046, 1.4047, 1.4048, 1.4049, 1.4050, 1.4051, 1.4052, 1.4053, 1.4054, 1.4055, 1.4056, 1.4057, 1.4058, 1.4059, 1.4060, 1.4061, 1.4062, 1.4063, 1.4064, 1.4065, 1.4066, 1.4067, 1.4068, 1.4069, 1.4070, 1.4071, 1.4072, 1.4073, 1.4074, 1.4075, 1.4076, 1.4077, 1.4078, 1.4079, 1.4080, 1.4081, 1.4082, 1.4083, 1.4084, 1.4085, 1.4086, 1.4087, 1.4088, 1.4089, 1.4090, 1.4091, 1.4092, 1.4093, 1.4094, 1.4095, 1.4096, 1.4097, 1.4098, 1.4099, 1.4100, 1.4101, 1.4102, 1.4103, 1.4104, 1.4105, 1.4106, 1.4107, 1.4108, 1.4109, 1.4110, 1.4111, 1.4112, 1.4113, 1.4114, 1.4115, 1.4116, 1.4117, 1.4118, 1.4119, 1.4120, 1.4121, 1.4122, 1.4123, 1.4124, 1.4125, 1.4126, 1.4127, 1.4128, 1.4129, 1.4130, 1.4131, 1.4132, 1.4133, 1.4134, 1.4135, 1.4136, 1.4137, 1.4138, 1.4139, 1.4140, 1.4141, 1.4142, 1.4143, 1.4144, 1.4145, 1.4146, 1.4147, 1.4148, 1.4149, 1.4150, 1.4151, 1.4152, 1.4153, 1.4154, 1.4155, 1.4156, 1.4157, 1.4158, 1.4159, 1.4160, 1.4161, 1.4162, 1.4163, 1.4164, 1.4165, 1.4166, 1.4167, 1.4168, 1.4169, 1.4170, 1.4171, 1.4172, 1.4173, 1.4174, 1.4175, 1.4176, 1.4177, 1.4178, 1.4179, 1.4180, 1.4181, 1.4182, 1.4183, 1.4184, 1.4185, 1.4186, 1.4187, 1.4188, 1.418			



### Další parametry

Hodnota Poissonovy konstanty pro korozivzdorné oceli může být uvažována jako  $\nu = 0,3$  a smykový modul pružnosti jako  $G = 76,9 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup>.

Slide 28 poskytuje přehled mechanických vlastností korozivzdorné oceli převzatých z EN 10088. Jedná se o vlastnosti materiálu v žíhaném stavu (tj. bez vlivu tváření za studena).

## 30 Absorbování energie

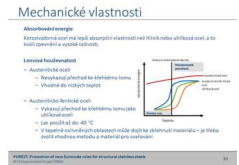
Korozivzdorná ocel má lepší vlastnosti absorpce energie než hliník nebo uhlíková ocel, a to kvůli zpevnění a vysoké tažnosti.

### Lomová houževnatost

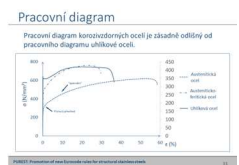
- Austenitické oceli
  - Nevykazují přechod ke křehkému lomu
  - Vhodné do nízkých teplot
- Austeniticko-feritické oceli
  - Vykazují přechod ke křehkému lomu stejně jako uhlíkové oceli
  - Lze použít běžně až do -40 °C
  - V tepelně ovlivněných oblastech může dojít ke zkřehnutí materiálu – je třeba zvolit vhodnou metodu a materiál pro svařování

Houževnatý = schopný velké deformace při zatížení rázem.

Křehký = schopný pouze malé deformace při po které dojde k porušení při rázovém zatížení.



31 Hlavním rozdílem mezi uhlíkovou a korozivzdornou ocelí je tvaru křivky pracovního diagramu, viz slide 31. Uhlíková ocel (plná čára) vykazuje pružné chování až do zřetelného bodu meze kluzu, po jehož překročení narůstá deformace bez nárůstu napětí. Po plastickém plató následuje zpravidla malé zpevnění. Oproti tomu korozivzdorná ocel (čárkovaná a čerchovaná) vykazuje plně nelineární průběh křivky s výrazným zpevněním materiálu (zajemena u ocelí austenitických).



Materiálové vlastnosti korozivzdorné oceli jsou rozdílné v porovnání s uhlíkovou ocelí:

- Nelineární pracovní diagram. Což vede k:
  - Rozdílné chování prutů při zatížení tlakem a ohybem (Stabilita)
  - Větší deformace
- Významné zpevnění materiálu (způsobené také tvářením za studena)

Kromě toho korozivzdorná ocel vykazuje:

- Asymetrii (tah a tlak)
- Anizotropii (rozdílné vlastnosti ve směru rovnoběžném a kolmém ke směru válcování).

Anizotropie = Vlastnosti závisí na směru, tudíž je nutné použít příslušné vlastnosti pro daný směr.

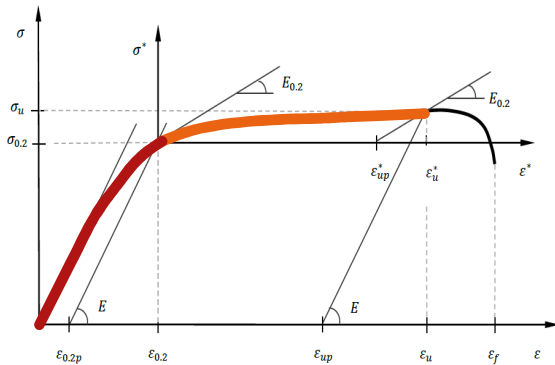
Nicméně z hlediska návrhu konstrukce není asymetrie a anizotropie zdaleka tak významná, jako nelineární průběh pracovního diagramu.

32 Pro výpočty je nutné znát model pracovního diagramu. Použití modelu uvažující pružné a následně dokonale plastické chování by nezhlednilo příznivý vliv zpevnění materiálu ani zakřivení před dosažením meze kluzu. Proto je pro aproximaci pracovního diagramu použit Ramberg-Osgoodův materiálový model.

Ramberg-Osgoodův model

Ramberg-Osgoodův materiálový model  
 - Konstruované oceli vykazují nelineární průběh křivky pracovního diagramu, bez zanedbání meze kluzu, s významným zpevněním a vysokou tažností.  
 - Místo vzhledu pružného, dokonale plastického materiálového modelu, se používá Ramberg-Osgoodův materiálový model.  
 - Nejvýznamnějším parametrem tohoto modelu je exponent 'n', který má zásadní vliv na zakřivení křivky pracovního diagramu.  

$$\sigma = \frac{\sigma_u}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n$$



$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \varepsilon_{0.2} + \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left( \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m & \sigma > \sigma_{0.2} \end{cases}$$

Vztahy jsou založené na chování austenitických a austeniticko-feritických třídách, ne vždy platí pro feritické.

Důsledná analýza více než 1000 zkoušek ukázala že:

- Zjednodušený model udávaný Přílohou C normy EN 1993-1-4 je platný pro všechny třídy korozivzdorných ocelí.
- Není žádný rozdíl v závislosti na směru zatížení, způsobu zatížení nebo úrovni tváření za studena.
- Některé rovnice je potřeba upravit.

Součinitel zpevnění:

Feritické oceli: menší tažnost a menší zpevnění

$$n = \frac{\ln 20}{\ln \left( \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}} \right)} \quad m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u}$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u}$$

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = 0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E}$$

$$n = \frac{\ln 4}{\ln \left( \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.05}} \right)} \quad m = 1 + 2.8 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u}$$

$$\varepsilon_u = 0.6 \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \right)$$

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = 0.46 + 145 \frac{\sigma_{0.2}}{E}$$

**NOVÝ NÁVRH**



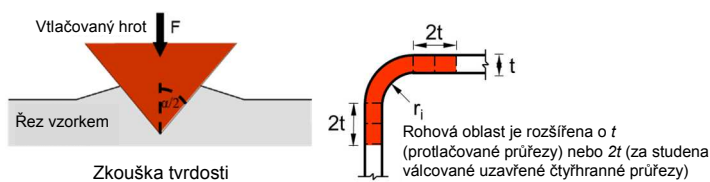
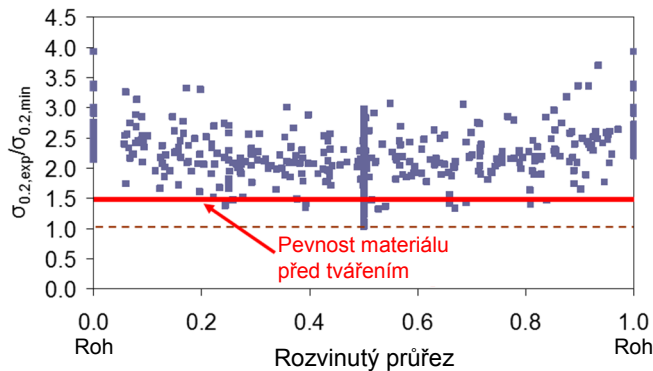


- 37 Rozřezáním vzorku na malé proužky a následné provedení tahových zkoušek umožňuje získat informace o pevnosti materiálu po obvodě průřezu. S dostatečným množstvím dat je možné vyvinout způsob jak rozdílné chování predikovat.



Shromážděné výsledky za studena válcovaných čtyřhranných uzavřených průřezů:

- Mechanicky založené predikční vztahy pro rovné části průřezu byly vyvinuty a ověřeny na základě shromážděných výsledků.
- Rozsah rohových oblastí byl zjištěn pomocí přesnějšího testování tvrdosti pomocí odvozené korelace s pevností.



Mechanicky založené predikční modely vyvinuté a ověřené na základě shromážděných výsledků; dvoustupňový proces

- Odhadnout plastickou deformaci vnesenou během tvářením průřezu pomocí jednoduchých geometrických vztahů ( $t$  a  $R$ )
- Stanovit napětí odpovídající plastické deformaci získané z materiálového modelu a uvažovat ho jako zvýšenou mez kluzu

Pro čtyřhranné uzavřené průřezy je typický nárůst hodnoty meze kluzu o 30 % v rovné části a o 50 % v rohové části.

Afshan, S., Rossi, B. and Gardner, L. (2013). Strength enhancements in cold-formed structural sections – Part I: Material testing. *Journal of Constructional Steel Research*. 83, 177-188.

Rossi, B., Afshan, S. and Gardner, L. (2013). Strength enhancements in cold-formed structural sections – Part II: Predictive models. *Journal of Constructional Steel Research*. 83, 189-196.

Cruise, R. B. and Gardner, L. (2008). Strength enhancements induced during cold forming of stainless steel sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 64(11), 1310-1316.

**Dále:** Korozivzdorná ocel je dostupná ve standardizovaných podmínkách procesu zpracování za studena. Pravidla udávaná normou EN 1993-1-4 a Příručkou mohou být použita i pro následující materiály:

- Pro CP350, charakteristická hodnota  $f_y = 350 \text{ N/mm}^2$
- Pro CP500, charakteristická hodnota  $f_y$  je redukována z 500 na  $460 \text{ N/mm}^2$  kvůli zohlednění asymetrie a anizotropie

Plastická deformace vzniklá vlivem tváření za studena může způsobit podstatný nárůst pevnosti. Příloha B *Příručky* poskytuje návod jak tento pevnostní nárůst zohlednit.

Nahrazením  $f_y$  průměrnou hodnotou zvýšené meze kluzu  $f_{ya}$ .

Výhody zvýšení pevnosti materiálu zpevněním může být zohledněno i při návrhu pomocí metody CSM, popsané v Příloze D *Příručky*.

38 Nevýhody plynoucí ze zpevnění materiálu zpracováním za studena:

- Pro výrobu jsou potřebné těžší a výkonnější zařízení, jelikož je nutné vyvinout větší síly,
- Snížená tažnost (nicméně, počáteční tažnost je stále vysoká, zejména v případě austenitických ocelí),
- Mohou vzniknout nežádoucí reziduální napětí.

V případě austenitických ocelí pokles tažnosti nezpůsobuje, vzhledem k jejich původní vysoké tažnosti, žádný problém.

Zpevnění materiálu

Nevýhody plynoucí ze zpevnění materiálu:  
 - Pro výrobu jsou potřebné těžší a výkonnější zařízení, jelikož je nutné vyvinout větší síly  
 - Snížená tažnost (nicméně, počáteční tažnost je stále vysoká, zejména v případě austenitických ocelí)  
 - Mohou vzniknout nežádoucí reziduální napětí

EN 10901 Handbook of steel Eurocode 3: Design of steel structures

**Zásady navrhování**

40 Hlavní část Eurokódu 3 věnující se korozivzdorným ocelím je EN 1993-1-4., která poskytuje dodatečné zásady pro jejich navrhování. Zásady jsou prezentované stejnou formou jako pravidla pro navrhování z uhlíkové oceli, se kterou mohou mít projektanti více zkušeností.

Eurokód 3

Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Additional rules for corrosion resistant steel  
 - Poskytuje zásady a doplňuje zásady pro uhlíkovou oceli uvedenou v dalších částech Eurokódu 3  
 - Platí pro budovy, mosty, nádrže, spod.

EN 10901 Handbook of steel Eurocode 3: Design of steel structures

41 Podstatným rozdílem jsou hodnoty dílčích součinitelů spolehlivosti, které jsou normou doporučeny (a v ČR přijaty beze změny):

- $\gamma_{M0} = 1,1$
- $\gamma_{M1} = 1,1$
- $\gamma_{M2} = 1,25$

Tyto hodnoty se liší od hodnot pro uhlíkovou ocel.

Eurokód 3

- Má stejný přístup jako pro uhlíkovou ocel  
 - Pro tabule zvyky a vzájemné nomenklatury udává stejné postupy jako v případě uhlíkové oceli  
 - Dílčí součinitel spolehlivosti:  
 -  $\gamma_{M0} = 1,1$   
 -  $\gamma_{M1} = 1,1$   
 -  $\gamma_{M2} = 1,25$   
 - Ukládá se například v klasifikační příloze, lokálním boulení a lokálních výhledových zornostech, a to kvůli:  
 - nelineárnímu průběhu křivky pracovního diagramu  
 - vlivu zpevnění materiálu  
 - rozdílným velikostem reziduálních napětí

EN 10901 Handbook of steel Eurocode 3: Design of steel structures

42 Tabulka udává jmenovité hodnoty meze kluzu  $f_y$  a meze pevnosti v tahu  $f_u$  konstrukčních korozivzdorných ocelí podle EN 10088 (N/mm<sup>2</sup>). Viz tabulka 2.2 *Příručky*.

Eurokód 3

EN 10901 Handbook of steel Eurocode 3: Design of steel structures

43 Při tlakovém zatížení může, kvůli malým tloušťkám materiálu, nastat stabilitní jev zvaný lokální boulení. Vlivem lokálního boulení únosnost průřezu nedosáhne hodnot pružné únosnosti.

Proto jsou průřezy rozděleny do čtyř tříd. Klasifikace průřezu ovlivňuje:

- Způsob výpočtu,
- Průřezové charakteristiky (plastické, pružné, účinné),
- Prut (vždy chceme vědět, jestli může být proveden plastický výpočet).

Klasifikace průřezu a lokální boulení

Při tlakovém zatížení může, díky malým tloušťkám materiálu, nastat destabilizační jev zvaný **LOKÁLNÍ** boulení.



EN 10901 Handbook of steel Eurocode 3: Design of steel structures

44 Klasifikace průřezu je nutná kvůli použití správných průřezových charakteristik a správného způsobu výpočtu:

- Pružný,
- Plastický,
- Účinný (redukované průřezové charakteristiky:  $A_{eff}$  a  $I_{eff}$ ).

Rozlišujeme čtyři třídy průřezu:

- **Průřez třídy 1** umožňuje vytvořit plastické klouby s rotační kapacitou požadovanou při plastickém výpočtu,
- **Průřez třídy 2** umožňuje vytvořit plastický moment únosnosti, ale je omezena jeho rotační kapacita,
- **Průřez třídy 3** za předpokladu pružného rozdělení může napětí v krajních tlačných vláknech ocelového prutu dosáhnout mez kluzu, ale v důsledku lokálního boulení není možné dosáhnout plastický moment únosnosti,
- **Průřez třídy 4** v důsledku lokálního boulení není možné dosáhnout mez kluzu v jedné nebo více částech průřezu.

Přehled stanovení únosnosti průřezu:

- Třídy průřezu 1 a 2 – plasticky,
- Třída průřezu 3 – pružně,
- Třída průřezu 4 – účinný průřez
  - Účinná plocha části průřezu s plnou plochou  $A_c$  se má stanovit jako:

$$A_{c,eff} = \rho A_c$$

kde  $\rho$  je součinitel boulení. Vnitřní tlačené části (za studena tvářené nebo svařované).

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{ale } \leq 1,0$$

Přečnívající tlačené části (za studena tvářené nebo svařované):

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{but } \leq 1,0$$

kde  $\bar{\lambda}_p$  je poměrná štíhlost stěny definovaná jako:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

Vztahy pro stanovení  $\rho$  jsou pro korozivzdorné oceli delší od těch pro uhlíkovou ocel. Princip postupu je však stejný.

Klasifikace průřezu a lokální boulení

Klasifikace průřezu je nutná kvůli použití správných průřezových charakteristik a správného způsobu výpočtu:  
Průřez  
- Plastický (nebo částečně plastický)  
- Účinný (redukované průřezové charakteristiky:  $A_{eff}$  a  $I_{eff}$ )  
Průřez třídy 1 umožňuje vytvořit plastické klouby s rotační kapacitou požadovanou při plastickém výpočtu.  
Průřez třídy 2 umožňuje vytvořit plastický moment únosnosti, ale je omezena jeho rotační kapacita.  
Průřez třídy 3 za předpokladu pružného rozdělení může napětí v krajních tlačných vláknech ocelového prutu dosáhnout mez kluzu, ale v důsledku lokálního boulení není možné dosáhnout plastický moment únosnosti.  
Průřez třídy 4 v důsledku lokálního boulení není možné dosáhnout mez kluzu v jedné nebo více částech průřezu.

45 Klasifikace průřezu a jeho zařazení do příslušné třídy je provedeno  
46 klasifikací všech plně, nebo částečně tlačných deskových částí  
průřezu. Štíhlost těchto částí,  $c/t$ , je porovnávána s limitními  
47 hodnotami tříd průřezu. Celý průřez spadá do stejné třídy, jako jeho  
nejštíhlejší část.

Dvě důležité poznámky:

Klasifikace průřezu a lokální boulení

Klasifikace průřezu  
- plastická klasifikace všech plně, nebo částečně tlačných deskových částí průřezu  
- je závislá na štíhlosti částí průřezu  
  
- Štíhlost částí průřezu je porovnávána s limitními hodnotami tříd průřezu v tabulce EN 1993-1-4 podle typu oceli (tabulka 4.1) a podle typu průřezu (tabulka 4.2).  
- Štíhlost částí průřezu je porovnávána s limitními hodnotami tříd průřezu v tabulce EN 1993-1-4 podle typu oceli (tabulka 4.1) a podle typu průřezu (tabulka 4.2).  
- Štíhlost částí průřezu je porovnávána s limitními hodnotami tříd průřezu v tabulce EN 1993-1-4 podle typu oceli (tabulka 4.1) a podle typu průřezu (tabulka 4.2).

- Třída průřezu = nejnepříznivější třída, do které spadá jakákoli tlačená část průřezu. Tedy, svařované nosníky se šíhlou stojinou jsou často průřezy 4. třídy.
- Limity pro třídy průřezu závisí na  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}}$ . Proto mnoho běžných průřezů z vysokopevnostních ocelí bude v méně příznivých třídách 3 nebo 4.

Jelikož limity jednotlivých tříd průřezu byly převzaty, byla snaha zpřesnit tyto limity pro korozivzdorné oceli. Na základě dat získaných z experimentů a teoretických prací bylo prokázáno, že současné limity jsou pro korozivzdornou ocel konzervativní. Ve vydání normy EN 1993-1-4 z roku 2014 již byly nahrazeny vyššími hodnotami.

Slidy 46 a 47 ukazují rozdílné limitní hodnoty pro uhlíkovou ocel a pro korozivzdornou ocel dle normy EN 1993-1-4 a dle nového vydání této normy roku 2014 s novými hodnotami.

Klasifikace průřezu a Lokální boulení

Vnitřní táhací část

Průřez	1	2	3	4
$\lambda_{fl}$	< 9,9	< 13,9	< 19,9	> 19,9
$\lambda_{tw}$	< 0,67	< 0,73	< 0,79	> 0,79
$\lambda_{pl}$	< 0,085	< 0,090	< 0,095	> 0,095
$\lambda_{pl,red}$	< 0,085	< 0,090	< 0,095	> 0,095

Klasifikace průřezu a Lokální boulení

Přetvářející část páteře

Průřez	1	2	3	4
$\lambda_{fl}$	< 9,9	< 13,9	< 19,9	> 19,9
$\lambda_{tw}$	< 0,67	< 0,73	< 0,79	> 0,79
$\lambda_{pl}$	< 0,085	< 0,090	< 0,095	> 0,095
$\lambda_{pl,red}$	< 0,085	< 0,090	< 0,095	> 0,095

48 Značení – rekapitulace.

Značení

- $N$  = tahová/tlačivá síla
- $M$  = ohybový moment
- $V$  = smyková síla

Indexy:

- $i$  = 1, 2, 3
- $e$  = střed
- $b$  = šířka
- $R_{yk}$  = návrhová únosnost
- $k_{yk}$  = návrhové koeficienty

Příklad:  $N_{yk,2}$  = návrhová tahová únosnost

49 Bez poznámek.

Únosnost průřezu

Tážené průřezy

Návrhová únosnost průřezu v rovinném tahu  $N_{yk}$ , se má stanovovat jako menší z:

- Plastická návrhová únosnost neoslabeného průřezu (v místě bez spojů)  $N_{yk,pl} = \frac{A_{eff} f_{yk}}{\gamma_{M0}}$
- návrhová únosnost oslabeného průřezu v místě děr pro spojovací prostředky  $N_{yk,red} = \frac{A_{eff,red} f_{yk}}{\gamma_{M0}}$

50 V závislosti na šířlosti prutu rozlišujeme dva druhy chování:

- Chování (krátkých) prutů malé šířlosti, jejichž únosnost je stanovena na základě únosnosti průřezu a ke kolapsu dochází významnou plastizací materiálu. Únosnost v prostém tlaku se stanoví jako  $N_y = A f_y$  (plocha x mez kluzu),
- Chování dlouhých prutů (sloupů s vysokou šířlostí), jejichž únosnost je dána únosností celého prutu a ke kolapsu dochází ztrátou stability (únosnost prutu nedosáhne únosnosti průřezu). Pružná kritická síla se značí  $N_{cr}$ , viz dále.

Únosnost průřezu

Tážené průřezy

$$k_{yk} < k_{yk} \Rightarrow \frac{N_{yk}}{N_{yk,pl}} \leq 1$$

- Průřezy třídy 1, 2 nebo 3  $N_{yk,pl} = \frac{A_{eff} f_{yk}}{\gamma_{M0}}$
- Průřezy třídy 4: viz lokálního boulení, nutně použít účinné průřezové charakteristiky  $N_{yk,pl} = \frac{A_{eff,red} f_{yk}}{\gamma_{M0}}$

51 Bez poznámek.

Únosnost průřezu

Ohybané průřezy

$$k_{yk} < k_{yk} \Rightarrow \frac{M_{yk}}{M_{yk,pl}} \leq 1$$

- Průřezy třídy 1 a 2  $M_{yk,pl} = \frac{W_{pl,y} f_{yk}}{\gamma_{M0}}$
- Průřezy třídy 3 (lokální boulení)  $M_{yk,pl} = \frac{W_{pl,y} f_{yk}}{\gamma_{M0}}$
- Průřezy třídy 4: viz lokálního boulení, nutně použít účinné průřezové charakteristiky  $M_{yk,pl} = \frac{W_{pl,y,red} f_{yk}}{\gamma_{M0}}$

52 Pro další informace ohledně stanovení  $A_v$ , viz tabulka 5.5 Příručky.

53

Únosnost průřezu

Průřezy ve smyku

Návrhová plastická únosnost průřezu ve smyku  $V_{yk,pl}$  se stanoví z vztahu:

$$V_{yk,pl} = \left( \frac{A_v f_{vk}}{\gamma_{M0}} \right)$$

kde  $A_v$  je smyková plocha

Rovněž je nutně ověřit odolnost vůči smykovému boulení (viz dále)

**Únosnost průřezu**

Svalžené I a II kompozitní průřez, zatížené rovnoběžně se sloupem:

$$A_s = \sum A_{s,i} + A_{sc}$$

Výkresové I a II průřez, zatížené rovnoběžně se sloupem:

$$A_s = A + 2A_{sc} + A_{sc} + 2A_{sc}$$

EN 1993-1-4: Appendix 1, 1.20

54 Štíhlé prvky zatížené tlakem jsou vystaveny destabilizujícímu jevu –  
55 vzpěru. Obvykle se u sloupů jedná o rovinný vzpěr – vybočení k ose  
menší tuhosti.

Velikost vlivu vzpěru je ovlivňována štíhlostí prutu:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

**Navrhování prvků**

**Štíhlé prvky zatížené tlakem** jsou vystaveny destabilizujícímu jevu – vzpěru. Obvykle se u sloupů jedná o rovinný vzpěr – vybočení k ose menší tuhosti.

**Navrhování prvků**

**Průřezové charakteristiky:**

- "I" poměr setrvačnosti k příčné ose **vybočení**, uvádí se ve stejných jednotkách jako délka prutu:  $I^2 \text{ m}^4$

**Štíhlost prutu**

$$\lambda = \frac{l_{cr}}{i} \quad \lambda \leq \frac{c}{i} \leq \bar{\lambda}$$

dále:  $\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$  **Velikost vlivu vzpěru at ovlivňována štíhlostí prutu**

56 Graf prezentuje chování "ideálního" prutu. Rozeznáváme dvě  
57 základní oblasti - tu kde dojde ke kolapsu v důsledku dosažení  
58 únosnosti průřezu a oblast, kde dojde ke kolapsu ztrátou stability prutu  
(únosnosti průřezu není dosaženo).

Únosnost skutečného prutu je však nižší, tu nepříznivě ovlivňuje:

- Počáteční geometrická imperfekce
- Excentricita zatížení
- Materiál není dokonale homogenní
- Reziduální prnutí
- ...

Křivky vzpěrnosti tudíž leží na, nebo pod křivkou pro ideální prut.

**Navrhování prvků**

**Chování "ideálního" prutu**

- Dvě teoretické hranice pro ideální tlakem prutu: únosnost průřezu (tečení materiálu) a vzpěr (vybočení):

**Navrhování prvků**

**Chování skutečného prutu**

- Dvě teoretické hranice pro ideální tlakem prutu: únosnost průřezu (tečení materiálu) a vzpěr (vybočení):

**Navrhování prvků**

**Chování skutečného prutu**

- Dvě teoretické hranice pro ideální tlakem prutu: únosnost průřezu (tečení materiálu) a vzpěr (vybočení):

59 Obecně se používá stejný postup jako v případě uhlíkové oceli, tedy návrh pomocí křivek vzpěrné pevnosti – únosnost průřezu v tlaku vynásobená součinitelem vzpěrné pevnosti  $\chi$ , ale využívá rozdílných křivek vzpěrné pevnosti pro sloupce (vzpěr) a nepodepřené nosníky (klopení).

*Poznámka: Ujistěte se, že používáte správnou hodnotu  $f_y$  pro danou třídu korozivzdorné oceli (minimální specifikované hodnoty poskytují normy EN 10088-4 a -5)*

**Navrhování prvků podle EN 1993-1-4**

- Obecně se používá stejný postup jako v případě uhlíkové oceli, tedy návrh pomocí křivek vzpěrné pevnosti – únosnost průřezu v tlaku vynásobená součinitelem vzpěrné pevnosti:  $\chi$
- Ats, vzhledem rozdílných křivek vzpěrné pevnosti pro sloupce (vzpěr) a nepodepřené nosníky (klopení)
- Ujistěte se, že používáte správnou hodnotu  $f_y$  pro danou třídu korozivzdorné oceli (minimální specifikované hodnoty poskytují normy EN 10088-4 a -5)

60 Vzpěrná únosnost tlaččeného prutu  $N_{b,Rd}$  se stanoví jako:

61 Pro průřezy třídy 1, 2 a 3:

62

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

Pro průřezy třídy 4:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$$

**Rovinný vzpěr**

Vzpěrná únosnost  $N_{b,Rd}$ :

- Průřezy třídy 1, 2 a 3:  $N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$
- Průřezy třídy 4: vliv lokálního bočení, nutné použít účinné průřezové charakteristiky:  $N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$

**Ats, je vzhledem rozdílných křivek vzpěrné pevnosti**

Vliv vzpěru může být ignorován a prvkůvek bude následně proveden pouze na základě únosnosti průřezu, pokud:

$$\lambda \leq \lambda_0 \text{ nebo } \frac{l_{cr}}{i} \leq \lambda_0$$



kde  $\chi$  je součinitel vzpěrnosti, podle vztahu:

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$$

Poměrná štíhlost prutu  $\bar{\lambda}$  se může stanovit jako:

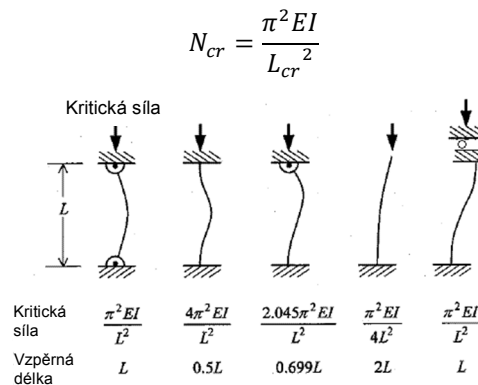
Pro průřezy třídy 1, 2 a 3:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$

Pro průřezy třídy 4:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y \frac{A_{eff}}{A}}{E}}$$

$N_{cr}$  je pružná kritická síla pro příslušný způsob vybočení, určena pro vlastnosti plného průřezu.  $L_{cr}$  značí vzpěrnou délku prutu, jejíž hodnota má být stanovena na základě okrajových podmínek (uložení prutu).



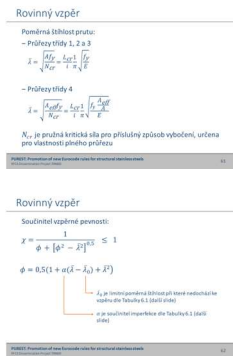
$\alpha$ ,

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$$

Křivky vzpěrné pevnosti se stanovují pomocí stejného vzorce, jako v případě uhlíkové oceli, pouze součinitel imperfekce  $\alpha$  (tabulka 6.1 nebo slide 61) a poměrná limitní štíhlost prutu  $\bar{\lambda}_0$  (tabulka 6.1 nebo slide 61) jsou rozdílné.

Vliv vzpěru může být ignorován a posudek bude následně proveden pouze na základě únosnosti průřezu, pokud:

$$\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad \text{nebo} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq \bar{\lambda}_0^2$$



63 Bez poznámek.

64

Rovinný vzpěr

Stavení křivky vzpěrné pevnosti závisí na typu průřezu, způsobu výroby a na ose průřezu:

Průřez	Osa	$\lambda_{LT}$	$\lambda_{LT}$	$\lambda_{LT}$
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2

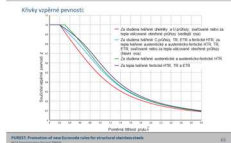
Rovinný vzpěr

Stavení křivky vzpěrné pevnosti závisí na typu průřezu, způsobu výroby a na ose průřezu:

Průřez	Osa	$\lambda_{LT}$	$\lambda_{LT}$	$\lambda_{LT}$
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2

65 Graf zobrazuje křivky vzpěrné pevnosti pro různé průřezy.

Rovinný vzpěr



66 V příkladě jsou porovnány pruty z korozivzdorné oceli a z uhlíkové oceli, podobných vlastností, zatížené osovým tlakem. Výpočet únosnosti prutu z korozivzdorné oceli je proveden podle EN 1993-1-4 a 67 *Příručky*. Jediným rozdílem ve výpočtech je v limitní poměrné štiřlosti, od které se projeví vliv zpěru  $\lambda_{0}$ .

Příklad: Rovinný vzpěr

- Za studena tvářený čtvercový osový průřez namáhaný centrickým tlakem

Materiál	U <sub>T</sub>	U <sub>T</sub> (kor)
S235	235 N/mm <sup>2</sup>	235 N/mm <sup>2</sup>
S275	275 N/mm <sup>2</sup>	275 N/mm <sup>2</sup>

V tomto případě je vzpěrná únosnost prutu z uhlíkové a korozivzdorné oceli podobná. Výhoda pramenící ze zpevnění materiálu nebyla zohledněna, protože v EN 1993-1-4 tento jev není zahrnut.

Příklad: Rovinný vzpěr

Průřez	Osa	$\lambda_{LT}$	$\lambda_{LT}$	$\lambda_{LT}$
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2

Pro zahrnutí zpevnění materiálu může být využita Příloha B *Příručky*, nebo metoda CSM (Příloha D *Příručky*).

Příklad: Rovinný vzpěr

- Tak:

Průřez	Osa	$\lambda_{LT}$	$\lambda_{LT}$	$\lambda_{LT}$
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSx	0,45	0,2	0,2
Obdélníkový průřez	OSy	0,45	0,2	0,2

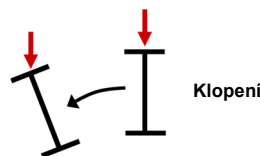
69 Nosníky, které nemají tlačenu pásnici dostatečně podepřenou v příčném směru, mohou být náchylné na klopení. Aplikované zatížení vnáší do pásnic rozdílné namáhání – horní je tlačena a druhá tažená.

Klopení

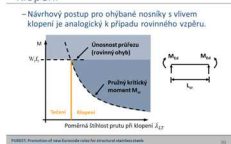
Vliv klopení může být zanedbán, pokud:

- Prut je namáhan ohybem okolo vedlejší osy
- Tlačena pásnice prutu je dostatečně podepřena v příčném směru po celé své délce
- Pruty s poměrnou štiřlostí při klopení:  $\lambda_{LT} \leq 0,4$  nebo  $\frac{M_{Ed}}{M_{Cr}} \leq 0,16$

71 Tlačena pásnice může mít tendenci vybočit do strany, čímž nosník rázem ztrácí stabilitu, proto je tomu buď zabránit jejím podepřením v příčném směru, nebo zahrnutím vlivu klopení do výpočtu.



Klopení



Vliv klopení může být zanedbán, pokud:

Klopení

Ohybová únosnost v ohybu klopení  $M_{Ed}$  prutu (nebo část prutu) nachýlného na klopení se stanovuje:

$$M_{Ed} \leq \chi_{LT} M_{cr}$$

$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 + \lambda_{LT}^2}}$

$\phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2]$

$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{Ed}}{M_{cr}}}$

- Prut je namáhan ohybem okolo vedlejší osy,
- Tlačena pásnice prutu je dostatečně podepřena v příčném směru po celé své délce,
- Pruty s poměrnou štiřlostí při klopení

$$\lambda_{LT} \leq 0,4 \text{ nebo } \frac{M_{Ed}}{M_{Cr}} \leq 0,16,$$

- Pruty o průřezích, které nejsou náchylné na klopení, jako jsou například kruhové a čtvercové trubky.

U všech ostatních prutů by ohybová únosnost s vlivem klopení měla být stanovena z následující rovnice:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

$W_y = W_{pl,y}$  pro průřezy třídy 1 a 2

$W_y = W_{el,y}$  pro průřezy třídy 3

$W_y = W_{eff,y}$  pro průřezy třídy 4

$\chi_{LT}$  je součinitel klopení daný vztahem:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1$$

kde:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right)$$

$\alpha_{LT}$  je součinitel imperfekce při klopení. Hodnoty  $\alpha_{LT}$  jsou odlišné od hodnot pro uhlíkovou ocel.

$\alpha_{LT} = 0,34$  pro za studena tvarované a uzavřené průřezy (svařované a bezešvé),

$\alpha_{LT} = 0,76$  pro svařované otevřené průřezy a jiné průřezy, pro které nejsou dostupná žádná zkušební data.

Hodnota 0,4 v rovnici výše značí limitní poměrnou štíhlost při klopení, viz slide 71 (liší se od hodnoty pro uhlíkovou ocel).

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

$M_{cr}$  je pružný kritický moment pro vliv klopení (viz Příloha E Příručky).

Postup výpočtu je stejný jako pro nosníky z uhlíkové oceli.

Průběh ohybového momentu mezi výztuhami proti ztrátě příčné stability prvku může být zohledněno pomocí modifikované hodnoty  $\chi_{LT}$ :

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f}$$

$$\text{ale } \chi_{LT,mod} \leq 1 \text{ a } \chi_{LT,mod} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2}$$

minimální hodnota  $f$  je doporučena jako:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \left[ 1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] < 1,0$$

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}}$$

Hodnoty  $C_1$  jsou uvedeny v Příloze E Příručky.

72 V případě vysokých a štíhlých stojin průřezu dochází k boulení ve smyku. To je nutné ve výpočtu zohlednit pokud:

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{56,2\varepsilon}{\eta} \quad \text{v případě nevyztužených stojin}$$

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{24,3\varepsilon\sqrt{k_t}}{\eta} \quad \text{v případě vyztužených stojin}$$

Návrhová únosnost ve smyku s vlivem boulení ve smyku se má určit jako:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

Celková únosnost ve smyku s vlivem boulení se sestává ze součtu příspěvku stojiny a pásnic. Zjednodušeně se může příspěvek pásnic  $\chi_f$  zanedbat. Pokud únosnost pásnic není pro ohybový moment plně využita ( $M_{Ed} < M_{f,Rd}$ ), má se příspěvek pásnic stanovit následovně:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[ 1 - \left( \frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$$

Hodnoty  $\eta$ , viz EN 1993-1-5 (EN 1993-1-4 doporučuje  $\eta = 1,20$ .)

Poznámka: Ve výpočtu plastické smykové únosnosti by měla být použita stejná hodnota  $\eta$  jaká byla použita pro výpočet smykové únosnosti s vlivem boulení.

Veškeré informace o posouzení boulení ve smyku smykového jsou uvedeny v kapitole 6.4.3 Příručky.

V případě uhlíkové oceli je postup podobný, pouze s rozdílnými limitními hodnotami. Například, smykové boulení je nutné posoudit, pokud:

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{72\varepsilon}{\eta} \quad \text{v případě nevyztužených stojin (uhlíková ocel);}$$

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{31\varepsilon\sqrt{k_t}}{\eta} \quad \text{v případě vyztužených stojin (uhlíková ocel).}$$

Smykové boulení

**Průhyb**

74 Průhyby mají být určeny pro kombinaci zatížení v příslušném mezním stavu použitelnosti.

75 Průhyby pružných prutů (tj. těch, které neobsahují plastické klouby) mohou být stanoveny standardní konstrukčním postupem, ale s tím rozdílem že modul pružnosti bude nahrazen sečnovým modulem pružnosti. Hodnota sečnového modulu pružnosti se mění v závislosti na velikosti napětí v prutu a může být získána ze vztahu:

$$E_S = \frac{(E_{S1} + E_{S2})}{2}$$

$E_{S1}$  je sečnový modul pro napětí  $\sigma_1$  v tažené pásnici,  
 $E_{S2}$  je sečnový modul pro napětí  $\sigma_2$  v tlačené pásnici.

Průhyb

Průhyb

Hodnoty modulů  $E_{S,1}$  a  $E_{S,2}$  pro příslušné návrhové napětí v mezním stavu použitelnosti  $\sigma_{i,ED,ser}$  a směr válcování se mohou vypočítat z výrazu:

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,ED,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,ED,ser}}{f_y} \right)^n}$$

Doporučené hodnoty součinitele nelinearity  $n$  jsou uvedeny v tabulce 6.4 Příručky.

Kvůli nelineárním materiálovým vlastnostem se modul pružnosti mění v rámci průřezu a také po délce prutu. Proto jsou pro přesné stanovení průhybu prutu z korozivzdorné oceli potřebné komplexní nelineární postupy. Pro zjednodušení může být zanedbána proměnlivost sečnového modulu pružnosti  $E_s$  po délce prutu, na které může být konstantně uvažována minimální hodnota  $E_s$  (odpovídající hodnotám maximálních napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$ ). Tato metoda je přesná pro stanovení průhybu pouze v případě, že je sečnový modul pružnosti získán pomocí maximálních napětí v prutu, která nepřesahují 65 % z 0,2% smluvní meze kluzu. Při vyšších napětích se tato metoda stává vysoce konzervativní, tudíž je vhodné využít jiný, přesnější, postup (například metodu integrací po délce prutu).

#### EN 1993-1-4

Norma EN 1993-1-4 v současné době udává hodnoty součinitele  $n$  v závislosti na třídě oceli a směru válcování. Hodnoty pro austeniticko-feritické oceli jsou získány z velmi malého množství dat a jsou považovány za příliš nízké. Očekává se, že tyto hodnoty (viz tabulka 6.5 Příručky) budou v příštím vydání normy EN 1993-1-4 nahrazeny hodnotami z tabulky 6.4 Příručky.

**Průhyb**  
- Sférická hodnota sečnového modulu  $E_s$  odpovídá napětí  $\sigma_i$  v tabulce páteří a  $\sigma_j$  v tlačné páteři:  
$$E_s = \frac{(E_{s1} + E_{s2})}{2}$$
  
- Pro zjednodušení může být zanedbána proměnlivost sečnového modulu pružnosti  $E_s$  po délce prutu – lze uvažovat konstantní minimální hodnotu sečnového modulu po celé délce prutu.

EN 1993-1-4:2005, Tabulka 6.4 – Hodnoty součinitele nelinearity  $n$  podle třídy oceli a směru válcování

### Zvýšení pevnosti průřezů tvářených za studena

- 78 Benefity plynoucí ze zvýšení pevnosti lze využít pro všechny typy  
79 průřezů tvářených za studena. Zpevnění vznikající při výrobě tvářením  
80 za studena může být při návrhu průřezu nebo prutu zahrnuto  
nahrazením smluvní meze kluzu  $f_y$  průměrnou zvýšenou mezí kluzu  $f_{ya}$ .

Výhody zvýšení pevnosti materiálu zpevněním může být zohledněno i při návrhu pomocí metody CSM, popsané v Příloze D Příručky.

Postup výpočtu, viz Příloha B Příručky.

**Zvýšení pevnosti průřezů tvářených za studena**  
- Může být využito u všech typů průřezů tvářených za studena  
- Zahrnuje výhody pramenící z výrobku procesu (tvářením za studena)  
- Lze využít pro návrh jak průřezu, tak prutu  
- Nahrazením  $f_y$  průměrnou hodnotou zvýšené meze kluzu  $f_{ya}$   
Výhody zvýšení pevnosti materiálu zpevněním může být zohledněno při návrhu pomocí metody CSM, popsané v Příloze D Příručky.

EN 1993-1-4:2005, Příloha D – Zvýšení pevnosti průřezů tvářených za studena

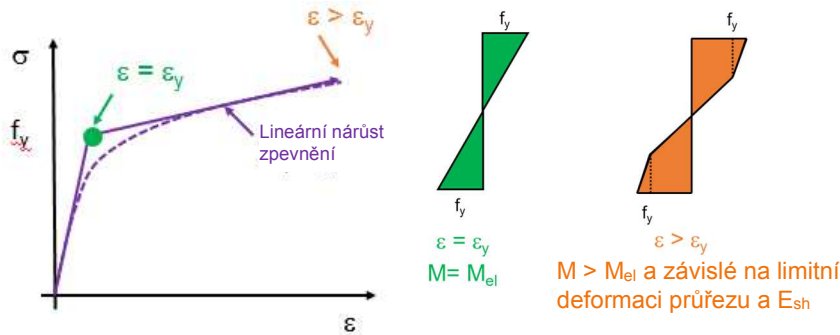
### Metoda CSM (Continuous Strength Method)

- 82 Jak již bylo zmíněno dříve, modul pružnosti a mez kluzu  
83 korozivzdorných ocelí se nijak výrazně neliší od hodnot uhlíkové oceli.  
Avšak tvar pracovního diagramu je poměrně odlišný:

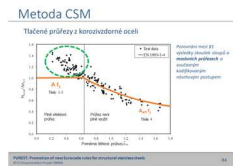
- Uhlíková ocel má jasně zřetelnou mez kluzu následovanou plastickým plato (poté následuje malé zpevnění)
- Korozivzdorná ocel je materiál s nelineárními pracovním diagramem a bez jasně definované meze kluzu, avšak s výrazným zpevněním materiálu, viz naětí po průřezu:

**Metoda CSM**  
Nelineární materiálový model a výlu zpevnění materiálu korozivzdorné oceli není zahrnut v běžných standardních postupech. Nevypovídá se tedy přímo o potenciálu průřezu. Metoda CSM používá materiálový model, který zahrnuje výlu zpevnění materiálu.  
Metoda CSM používá materiálový model, který zahrnuje výlu zpevnění materiálu.  
Metoda CSM používá materiálový model, který zahrnuje výlu zpevnění materiálu.

EN 1993-1-4:2005, Příloha D – Zvýšení pevnosti průřezů tvářených za studena

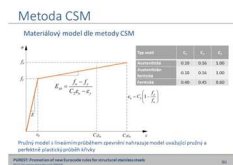


84 Graf zobrazuje shromážděná data chování tlačných průřezů z korozivzdorné oceli. Na svislé ose jsou vyneseny hodnoty meze kluzu získané ze zkoušek a na vodorovné ose je poměrná štíhlost průřezu. Oranžová křivka reprezentuje současný návrhový přístup, jehož charakter je podobný tomu pro uhlíkovou ocel - uvažuje pružné a následně dokonale plastické chování.



Zajímavá data jsou v levé části křivky (bez vlivu vzpěru). Všechny vzorky v této části grafu se pohybují nad křivkou, tím pádem vykazují vyšší únosnost. To je způsobeno vlivem zpevnění materiálu, avšak současné normy omezují jejich únosnost na hodnotu meze kluzu, což je, jak je vidět, značně konzervativní. Lze tedy říci, že současné kodifikované postupy pro korozivzdornou ocel jsou v některých případech značně konzervativní, zejména pro masivní průřezy. Totéž platí pro případ ohybové únosnosti.

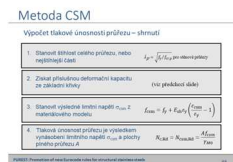
86 Pružný model s lineárním nárůstem zpevnění nahrazuje model uvažující pružné a následně dokonale plastické chování.



87 První krok metody CSM je stanovení deformační kapacity průřezu. Jinými slovy, zjistit jaké deformace je průřez schopen, než dojde ke kolapsu vlivem lokálního boulení. Jedná se o vztah mezi deformační kapacitou průřezu a poměrnou štíhlostí průřezu, jehož výsledkem je tzv. základní křivka.



Dále se využije limitní deformace průřezu  $\epsilon_{csm}$  a druhé klíčové komponenty metody CSM, kterou je materiálový model zohledňující zpevnění materiálu (sklon lineární křivky udávající zpevnění materiálu se mění v závislosti na uvažované třídě oceli – jednotlivé třídy mohou mít rozdílný vliv zpevnění).



$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y / f_{cr,p}}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y / f_{cr,c}} \quad \text{pro kruhové trubky}$$

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \epsilon_y \left( \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} - 1 \right)$$

Pro průřezy s  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$  a pro kruhové trubky s  $\bar{\lambda}_c \leq 0,30$  přičemž  $\epsilon_{csm} / \epsilon_y \geq 1,0$  se únosnost průřezu namáhaného tlakem stanoví jako:

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}}$$



Pro průřezy s  $\bar{\lambda}_p > 0,68$  a pro kruhové průřezy s  $\bar{\lambda}_c > 0,30$  přičemž  $\varepsilon_{\text{csm}}/\varepsilon_y < 1,0$  se únosnost průřezu namáhaného tlakem stanoví jako:

$$N_{\text{c,Rd}} = N_{\text{csm,Rd}} = \frac{\varepsilon_{\text{csm}} A f_y}{\varepsilon_y \gamma_{M0}}$$

Výpočet ohybové únosnosti pomocí metody CSM, viz Příloha D Příručky.

## Závěr

90 Korozivzdorná ocel je materiál, který nabízí významné výhody oproti uhlíkové oceli. Kvůli nedostatku přesných návrhových postupů ještě není korozivzdorná ocel ve stavebnictví tak často používána. Doufáme, že zhotovením a vydáním zmiňované Příručky inspirujeme stávající a nové generace k využívání korozivzdorné oceli jako stavebního materiálu.

Veškeré podklady projektu PUREST jsou ve všech jazycích zdarma ke stažení na adrese:

[www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual)

## Závěr

Korozivzdorná ocel je pozoruhodný materiál, který nabízí významné výhody oproti uhlíkové oceli. Kvůli nedostatku přesných návrhových postupů ještě není korozivzdorná ocel ve stavebnictví tak často používána. Doufáme, že zhotovením a vydáním zmiňované Příručky inspirujeme stávající a nové generace k využívání korozivzdorné oceli jako stavebního materiálu.

Veškeré podklady projektu PUREST jsou ve všech jazycích zdarma ke stažení na adrese:  
[www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual)

© 2017 Steel Institute of England and Wales. Všechna práva vyhrazena.