

PŘÍRUČKA PRO NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z KOROZIVZDORNÉ OCELI

4. VYDÁNÍ



PŘÍRUČKA PRO NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z KOROZIVZDORNÉ OCELI

4. VYDÁNÍ

Titulní strana:

Nahoře vlevo:

Přístřešek, Napp Pharmaceutical, Cambridge, VB
Třída 1.4401, Laskavě poskytl: m-tec

Nahoře vpravo:

Část konstrukce pro těžbu zemního plynu v moři
Třída 1.4301, Laskavě poskytl: Montanstahl

Dole vlevo:

Mlékárna Cornell University, College of Agriculture and Life Sciences,
Třída 1.4301/7, Laskavě poskytl: Stainless Structural

Dole vpravo:

Lávka pro pěší v Águilas, Španělsko
Třída 1.4462, Laskavě poskytl: Acuamed

Design manual for structural stainless steel

© 2017 SCI. All rights reserved.

www.steel-sci.com

Publikováno: SCI, Silwood Park, Ascot, Berks, SL5 7QN, UK

Příručka pro navrhování konstrukcí z korozivzdorné oceli

Z anglického originálu přeložili:

© 2017 ČVUT v Praze, doc. Ing. Michal Jandera, Ph.D., Ing. Břetislav Židlický, Ing. Marek Šorf.

Vytiskla Česká technika - nakladatelství ČVUT v Praze

Září 2017, 200 výtisků

ISBN 978185942 2359

www.fsv.cvut.cz

ÚVOD

Čtvrté vydání

Čtvrté vydání této příručky bylo připraveno Nancy Baddoo z The Steel Construction Institutu ve Velké Británii jako součást projektu Výzkumného fondu pro uhlí a ocel Evropské komise RFCS *Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels* (PUREST) (č. 709600).

Jedná se o kompletní revizi předchozího třetího vydání; hlavní změny jsou:

- Vztah textu ke Změně A1 2015 normy EN 1993-1-4;
- Zahrnutí 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 k. 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).

Organizace spolupracující na projektu PUREST byly:

The Steel Construction Institute (SCI)
(koordinátor)

Silwood Park, Ascot, SL5 7QN,
Velká Británie,
www.steel-sci.com

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Calle Jordi Girona 31, Barcelona 08034
Španělsko
www.upc.edu

Universität Duisburg-Essen (UDE)

Universitätsstraße 2, Essen 45141, Německo
www.uni-due.de

Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven)

Oude Markt 13, Lovaň 3000, Belgie
www.kuleuven.be

**RINA Consulting - Centro Sviluppo
Materiali S.p.A (CSM)**

Via Di Castel Romano 100, Řím 00128, Itálie
www.rinaconsulting.org/en/csm

Stalbyggnadsinstitutet (SBI)

Kungsträdgårdsgatan 10, 111 47 Stockholm,
Švédsko
www.sbi.se

**Politechnika Rzeszowska im. Ignacego
Lukasiewicza (PRz)**

al. Powstancow Warszawy 12, Řešov, 35
959, Polsko
www.prz.edu.pl

**Imperial College of Science Technology
and Medicine**

South Kensington Campus Exhibition Road,
Londýn, SW7 2AZ, Velká Británie
www.imperial.ac.uk

Teräsrakenneyhdistys ry

Unioninkatu 14 3 krs, Helsinky 00130, Finsko
www.terasrakenneyhdistys.fi

**České vysoké učení technické v Praze
(CVUT)**

Zikova 4, Praha 16636, Česká republika
www.cvut.cz

Universidade de Coimbra

Paço das Escolas, Coimbra, 3001 451,
Portugalsko
www.uc.pt

OneSource Consultoria Informática

Urbanização Ferreira Jorge - 1º dto Lote 14,
Coimbra 3040 016 , Portugalsko
www.onesource.pt

Následující osoby přispěli k přípravě tohoto čtvrtého vydání příručky:

- Sheida Afshan (Brunel University Londýn, VB);
- Itsaso Arrayago (Universitat Politècnica de Catalunya, Španělsko);
- Leroy Gardner (Imperial College Londýn, VB);
- Graham Gedge (Arup, VB);
- Michal Jandera (České vysoké učení technické v Praze, Česká Republika);
- Esther Real (Universitat Politècnica de Catalunya, Španělsko);
- Barbara Rossi (KU Leuven, Belgie);
- Natalie Stranghöner (Universität Duisberg-Essen, Německo);
- Ou Zhao (Nanyang Technological University, Singapur).

Úvod pro třetí vydání

Třetí vydání příručky bylo připraveno The Steel Construction Institutem jako výstup projektu RFCS - *Valorisation Project – Structural design of cold worked austenitic stainless steel* (č. RFS2-CT-2005-00036). Jedná se o kompletní revizi druhého vydání rozšiřující rozsah o za studena zpracované (cold worked) austenitické korozivzdorné oceli a aktualizaci odkazů na předběžnou verzi Eurokódů. Třetí vydání odkazuje na relevantní části EN 1990, EN 1991 a EN 1993. Byl doplněn postup pro návrh konstrukcí za požáru v kapitole 8 a byly přidány nové části pro trvanlivost korozivzdorných ocelí při styku s půdou a pro stanovení nákladů po celou dobu životnosti konstrukce (LCC - life cycle costing). Byly přidány tři nové příklady pro demonstraci návrhu za studena zpracovaných korozivzdorných ocelí. K vydání přispěli jak členové z každé spolupracující organizace, tak členové sponzorujících organizací, kteří dohlíželi na tvorbu příručky i se podíleli na jejím vzniku. Na třetím vydání příručky se podíleli následující organizace:

- The Steel Construction Institute (SCI) (koordinátor);
- Centro Sviluppo Materiali (CSM);
- CUST, Blaise Pascal University;
- Euro Inox;
- RWTH Aachen, Institute of Steel Construction;
- VTT Technical Research Centre of Finland;
- The Swedish Institute of Steel Construction (SBI);
- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

Úvod pro druhé vydání

Třetí vydání příručky bylo připraveno organizací The Steel Construction Institute jako výstup projektu ECSC, *Valorisation Project – Development of the use of stainless steel in construction* (č. 7215-PP-056). Jedná se o kompletní revizi prvního vydání *Příručky pro navrhování konstrukcí z korozivzdorné oceli* připravené organizací The Steel Construction Institute v letech 1989 a 1992 a publikované společností Euro Inox v roce 1994. Toto nové vydání zahrnuje pokrok v porozumění chování korozivzdorných ocelí v konstrukcích za posledních 10 let. Konkrétně zahrnuje nová návrhová pravidla z nedávno dokončeného projektu podporovaného ECSC, *Development of the use of stainless steel in construction* (č. 7210-SA/842), který vedl k rozšíření zaměření příručky na kruhové uzavřené profily a návrh konstrukcí za požáru. Během posledních deseti let bylo publikováno mnoho Evropských norem zahrnujících vlastnosti korozivzdorných ocelí, spojovací prostředky, výrobu, montáž, svařování apod. Příručka byla aktualizována a vztažena k těmto normám.

PODĚKOVÁNÍ

Toto vydání příručky bylo podpořeno finanční podporou a přispěním následujících organizací. Jejich pomoc je velmi oceňována.

- Výzkumný fond pro uhlí a ocel Evropské komise;
- Outokumpu;
- Aperam;
- Industeel;
- Acerinox;
- Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM);
- Nickel Institute;
- Stalalube.

PŘEDMLUVA

Tato příručka byla připravena jako pomůcka projektantům se zkušenostmi s navrhováním ocelových konstrukcí ne však nutně konstrukcí z korozivzdorných ocelí. Příručka nemá žádný právní status a nezprošťuje projektanta odpovědnosti z ověření bezpečnosti a funkčnosti navržené konstrukce.

Příručka je rozdělena do dvou částí:

- Část I - Návrhová pravidla;
- Část II - Příklady návrhu.

Pravidla uvedená v části I jsou založena na uvažování metody mezních stavů a jsou tedy obecně v souladu s aktuální verzí jednotlivých částí Eurokódu 3 *Navrhování ocelových konstrukcí*:

- EN 1993-1-1 *Navrhování ocelových konstrukcí: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*
- EN 1993-1-2 *Navrhování ocelových konstrukcí: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*
- EN 1993-1-3 *Navrhování ocelových konstrukcí: Obecná pravidla – Doplnující pravidla pro tenkostěnné za studena tvarované prvky a plošné profily*
- EN 1993-1-4 *Navrhování ocelových konstrukcí: Obecná pravidla – Doplnující pravidla pro korozivzdorné oceli*
- EN 1993-1-5 *Navrhování ocelových konstrukcí: Boulení stěn*
- EN 1993-1-8 *Navrhování ocelových konstrukcí: Navrhování styčnicků*
- EN 1993-1-9 *Navrhování ocelových konstrukcí: Únava*
- EN 1993-1-10 *Navrhování ocelových konstrukcí: Houževnatost materiálu a vlastnosti napříč tloušťkou*

Eurokód 3 se aktuálně reviduje a publikace nových verzí jeho částí včetně EN 1993-1-4 se očekává okolo roku 2023. V určitých případech příručka uvádí nové postupy nebo návrhové veličiny, které budou pravděpodobně do nové verze normy EN 1993-1-4 zahrnuty. Šedě podbarvená část pak v takových případech vysvětluje rozdíl mezi novými pravidly a pravidly používanými v současnosti v EN 1993-1-4:2015.

Příručka uvádí doporučené hodnoty součinitelů. Tyto mohou být měněny na národní úrovni pomocí Národní přílohy normy.

Řešené příklady obsažené v části II ukazují použití jednotlivých pravidel. V této části je použito křížových odkazů na konkrétní doporučený postup použitý v příkladu.

Návrhová pravidla včetně řešených příkladů jsou dostupná online na www.steel-stainless.org/designmanual a na Steelbiz, technickém informačním systému SCI (www.steelbiz.org). Podklad pro tvorbu příručky (Commentary to the Recommendations, pouze v angličtině), který taktéž obsahuje úplný souhrn použité literatury je rovněž dostupný online na webovém portálu. Účelem podkladu je umožnit projektantům přístup k podkladu návrhových pravidel a usnadnit jejich další vývoj a revize v případě nově dostupných výsledků. Při této příležitosti jsou prezentovány výsledky různých výzkumných programů provedených právě za účelem tvorby této příručky.

Návrhová pravidla uvedená v této příručce jsou založena na současném stupni poznání v době publikace. Nicméně autoři a členové pracovních skupin spojených s přípravou publikace nepřebírají jakoukoliv zodpovědnost za jakékoliv způsobené škody ať již na zdraví, životě, ztrátám, poškozením či zpožděním způsobených použitím příručky.

Obsah

	Strana
ÚVOD	ii
PODĚKOVÁNÍ	iv
PŘEDMLUVA	iv
ČÁST I – NÁVRHOVÁ PRAVIDLA	
1 ÚVOD	2
1.1 Co je korozivzdorná ocel?	2
1.2 Korozivzdorné oceli ve stavebnictví	3
1.3 Využití korozivzdorných ocelí ve stavebnictví	5
1.4 Rozsah příručky	6
1.5 Značky	6
1.6 Konvence pro osy prutu	9
1.7 Jednotky	9
2 VLASTNOSTI KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ	11
2.1 Základní materiálové vlastnosti	11
2.2 Faktory ovlivňující materiálové vlastnosti	13
2.3 Normy a návrhové pevnosti	14
2.4 Fyzikální vlastnosti	22
2.5 Vliv teploty	24
2.6 Zinkování a kontakt s roztaveným zinkem	24
2.7 Dostupné produkty	24
2.8 Náklady životního cyklu a dopad na životní prostředí	26
3 TRVANLIVOST A VÝBĚR MATERIÁLU	28
3.1 Úvod	28
3.2 Typy koroze a chování jednotlivých tříd korozivzdorné oceli	28
3.3 Koroze ve vybraných prostředích	32
3.4 Navrhování na omezení koroze	34
3.5 Výběr materiálu	36
4 ZÁSADY NAVRHOVÁNÍ	42
4.1 Základní požadavky	42
4.2 Navrhování podle mezních stavů	42
4.3 Zatížení	43
5 ÚNOSNOST PRŮŘEZŮ	44
5.1 Všeobecně	44
5.2 Největší poměry šířky ku tloušťce	44
5.3 Klasifikace průřezů	44
5.4 Účinné šířky	48
5.5 Výztuhy částí průřezu	53
5.6 Výpočet průřezových charakteristik	57
5.7 Únosnost průřezů	59
6 NAVRHOVÁNÍ PRVKŮ	64
6.1 Úvod	64
6.2 Tah	64

6.3	Tlak	64
6.4	Ohyb	69
6.5	Kombinace osově síly a ohybu	80
7	NAVRHOVÁNÍ SPOJŮ	83
7.1	Obecná doporučení	83
7.2	Šroubové spoje	84
7.3	Spoje tenkostěnných materiálů	90
7.4	Svarové spoje	90
8	NÁVRH NA ÚČINKY POŽÁRU	95
8.1	Všeobecně	95
8.2	Mechanické vlastnosti při zvýšené teplotě	95
8.3	Stanovení požární odolnosti konstrukcí	98
8.4	Tepelné vlastnosti při vysoké teplotě	105
8.5	Materiálový model při zvýšené teplotě	108
9	ÚNAVA	109
10	ZKOUŠKY	110
10.1	Obecné informace	110
10.2	Stanovení křivky pracovního diagram	110
10.3	Zkoušky prutů	110
11	HLEDISKA VÝROBY	112
11.1	Úvod	112
11.2	EN 1090 <i>Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí</i>	112
11.3	Třída provedení	113
11.4	Skladování a manipulace	114
11.5	Obráběcí procesy a tváření	115
11.6	Svařování	116
11.7	Zadírání a otěr	121
11.8	Úpravy povrchu	122
	Příloha A: KORELACE MEZI ZNAČENÍM KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ	124
	Příloha B: ZVÝŠENÍ PEVNOSTI PRŮŘEZŮ TVÁŘENÝCH ZA STUDENA	125
	Příloha C: MATERIÁLOVÝ MODEL	127
	Příloha D: METODA CSM (CONTINUOUS STRENGTH METHOD)	130
	Příloha E: PRUŽNÝ KRITICKÝ MOMENT PŘI KLOPENÍ	136
	ČÁST II – ŘEŠENÉ PŘÍKLADY	139

ČÁST 1 – NÁVRHOVÁ PRAVIDLA

1 ÚVOD

1.1 Co je korozivzdorná ocel?

Korozivzdorná ocel je název skupiny ocelí odolných vůči korozi a vlivům teploty na mechanické vlastnosti, obsahující minimálně 10,5 % chromu. Stejně jako existují různé typy uhlíkových ocelí, na které jsou kladeny rozdílné konstrukční a inženýrské požadavky (pevnost, svařitelnost, houževnatost, atd.), je široká škála typů korozivzdorných ocelí s různou úrovní pevnosti a odolnosti vůči korozi. Odlišnost vlastností korozivzdorných ocelí je způsobena použitím různých příměsí během legování. Každá z těchto příměsí má vliv na mechanické vlastnosti a na schopnost odolávat různým korozním podmínkám. Pro návrh je velmi důležité vybrat takovou korozivzdornou ocel, která nebude nadbytečně legovaná a drahá.

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 5×10^{-6} mm, tak 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.

Při rozdělování korozivzdorných ocelí rozeznáváme následujících pět typů, přičemž každý z nich poskytuje jedinečné vlastnosti a řadu různých úrovní odolnosti vůči korozi.

Austenitické korozivzdorné oceli

Nejčastěji používané oceli, 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. Ve srovnání s uhlíkovými oceli mají také výrazně vyšší houževnatost v širokém rozmezí teplot. Jejich pevnost může být zvýšena tvářením za studena, avšak nikoli tepelným zpracováním. Odolnost vůči korozi lze dále navýšit vyšším podílem obsahu chromu a přidávkem molybdenu a dusíku. Austenitické oceli jsou zdaleka nejčastěji používaný typ korozivzdorné oceli v oblasti stavebních konstrukcí a stavebnictví.

Feritické korozivzdorné oceli

U feritických ocelí se obsah chromu pohybuje mezi 10,5 a 18 %. Feritické oceli neobsahují žádné, nebo pouze velmi malé přísady niklu a jejich struktura je stejná jako u uhlíkových ocelí, tedy prostorově středěná struktura s kubickou mřížkou. Stojí méně než austenitické třídy s ekvivalentní odolností vůči korozi a jejich cena má menší rozptyl. Oproti austenitickým ocelím jsou méně tvárné a hůře svařitelné. Vlastnosti tváření a obrábění feritických ocelí jsou podobné vlastnostem uhlíkové oceli S355. Stejně jako u austenitických ocelí může být jejich pevnost navýšena tvářením za studena nikoli za tepla, avšak ve značně omezenější míře. Využívají se zejména v interiérech a v mírných venkovních atmosférických podmínkách. Mají dobrou odolnost vůči koroznímu praskání a jejich protikorozní vlastnosti mohou být dále navýšeny přidávkem molybdenu. Nabízejí alternativu k tenkostěnným

pozinkovaným plechům. Feritické oceli se obecně používají v tloušťce materiálu 4 mm a méně.

Austeniticko-feritické (duplexní) korozivzdorné oceli

Austeniticko-feritické oceli mají smíšenou mikrostrukturu austenitu a feritu, někdy se též nazývají jako duplexní oceli. Obvykle obsahují 20 až 26 % chromu, 1 až 8 % niklu, 0,05 až 5 % molybdenu a 0,05 až 0,3 % dusíku. Protože obsahují méně niklu než austenitické oceli, rozptýl jejich ceny je menší. V žíhaném stavu jsou zhruba dvakrát pevnější než oceli austenitické, což může být velmi cenné u konstrukcí citlivých na vlastní tíhu, jako jsou mosty nebo vrtné plošiny. Jsou vhodné pro širokou škálu korozních prostředí. Ačkoli austeniticko-feritické oceli mají dobrou tažnost, jejich vyšší pevnost má za následek, ve srovnání s austenitickými ocelmi, omezení tvárnosti. Stejně jako u ocelí austenitických a feritických, může být jejich pevnost navýšena tvářením za studena, ale nikoli tepelnou úpravou. Jsou dobře svařitelné a dobře odolávají koroznímu praskání. Mohou být považovány za doplňkové oceli k ocelím feritickým, jelikož mohou být využity i v případech větších tloušťek materiálu.

Martenzitické korozivzdorné oceli

Martenzitické 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. Obvykle se používají v tvrzeném a temperovaném stavu, což zajišťuje jejich vysokou pevnost a poskytuje mírnou odolnost vůči korozi. Používají se v místech, kde se využije jejich tvrdost a odolnost proti opotřebení a oděru. Vyrábí se z nich například chirurgické nástroje, příbory, průmyslové nože, lopatky turbín a otěrové desky. Martenzitické oceli mají malou tažnost a jsou tedy citlivější na vruby než oceli feritické, austenitické a austeniticko-feritické. Ačkoli většina martenzitických ocelí může být svařována, tak svařování může vyžadovat přehřívání a následné tepelné úpravy materiálu, což může vést k omezení jejich využití ve svařovaných dílcích.

Precipitačně vytvrzené korozivzdorné oceli

U precipitačně vytvrzených ocelí je možné navýšit pevnost tepelným zpracováním do velmi vysokých hodnot. Spadají do tří skupin mikrostruktur v závislosti na typu oceli: martenzitické, semi-austenitické a austenitické. Tyto oceli se obvykle nepoužívají při svařování. Jejich odolnost proti korozi je obecně vyšší než odolnost martenzitických ocelí a je podobná austenitické oceli s obsahem 18 % chromu a 8 % niklu. Ačkoli se využívají převážně v leteckém průmyslu, používají se také jako napínací tyče, hřídele, šrouby a obecně tam, kde je potřeba velmi vysoká pevnost a mírná odolnost vůči korozi.

Pokyny pro výběr třídy korozivzdorné oceli pro konkrétní využití jsou uvedeny v části 3.5.

1.2 Korozivzdorné oceli ve stavebnictví

Příručka se nadále věnuje pouze třem základním typům korozivzdorných ocelí nejčastěji využívaných ve stavebnictví – austenitickým, feritickým a austeniticko-feritickým. Jejich chemické složení a pevnosti jsou uvedeny v tabulce 2.1 a tabulce 2.2.

EN 1993-1-4 uvádí, v porovnání s touto příručkou, větší množství ocelí austenitických, ale méně feritických. Očekává se, že v příštím vydání normy EN 1993-1-4 budou zahrnuty všechny třídy feritických ocelí, uvedené v této příručce.

Pravidla navrhování uvedená v této příručce mohou být rovněž využita pro další austenitické, feritické a austeniticko-feritické oceli uvedené v EN 10088, ale musí být splněny podmínky uvedené v části 4.2. Pro získání informací o trvanlivosti, výrobě a svařitelnosti těchto tříd ocelí se doporučuje konzultace s výrobcem nebo jiným odborníkem.

Austenitické korozivzdorné oceli

Austenitické oceli se využívají převážně kvůli jejich pevnosti, odolnosti vůči korozi, tvárnosti (včetně možnosti menších poloměrů zakřivení) a vynikající svařitelnosti (v dílně i na staveništi). Vzhledem k jejich vysoké tažnosti jsou vhodné i pro seizmické využití.

Třídy 1.4301 (známé také jako 304) a 1.4307 (304L) jsou nejběžněji používanými austenitickými ocelmi. Obsahují 17,5 až 20 % chromu a 8 až 11 % niklu. Jsou vhodné pro venkovské, městské a lehké průmyslové objekty.

Třídy 1.4401 (316) a 1.4404 (316L) obsahují 16 až 18 % chromu, 10 až 14 % niklu a příměs 2 až 3 % molybdenu, který zvyšuje odolnost vůči korozi. Proto jsou vhodné pro mořské a průmyslové lokality.

Poznámka: Označení „L“ značí verzi s nízkým obsahem uhlíku, se sníženým rizikem senzibilizace (srážení karbidu chromu) a intergranulární koroze (koroze mezi zrny) v tepelně ovlivněných oblastech svarů. Pro svařované průřezy by měly být využity právě třídy „L“ nebo stabilizované oceli, například 1.4541 a 1.4571. Nízká hladina uhlíku nezvyšuje riziko vzniku koroze u oblasti svaru. Pokud výrobci používají nejmodernější výrobní technologie, tak jsou komerčně vyráběné korozivzdorné oceli často nízkouhlíkové a dvojitě certifikované (například 1.4301/1.4307 s vyšší pevností třídy 1.4301 a nižším obsahem uhlíku třídy 1.4307). Pokud se pro výrobu využije některé ze starších technologií, nedá se předpokládat výroba dvojitě certifikovaných ocelí. Proto by měla být v dokumentacích projektů, v nichž se provádí svařování, jasně specifikovaná třída oceli s nízkým obsahem uhlíku.

Třída 1.4318 je nízkouhlíková ocel s vysokým obsahem dusíku, která, pokud je tvářena za studena, dosahuje rychle vysokých pevností. Je již dlouhodobě používána v železničním průmyslu. Vhodná je také pro automobilový průmysl, letadla a architektonické využití. Tato třída oceli má podobnou odolnost vůči korozi jako třída 1.4301, ale dosahuje vyšších pevností. Je vhodná pro masivní prvky. Dodává ji přímo výrobce, u kterého je ale nutné předem ověřit dostupnost této třídy. Její cena bude pravděpodobně mírně vyšší než cena třídy 1.4301, závisí ale také na velikosti objednávky.

V současné době jsou již také dostupné třídy s vysokým obsahem chromu (zhruba 20 %) které budou zařazeny do EN 10088 v jejich dalších vydáních. Třída 1.4420 je příkladem oceli s vysokým obsahem chromu (a dusíku). Dosahuje vyšších pevností (okolo 390 N/mm²) než oceli austenitické (okolo 240 N/mm²) při zachování tažnosti.

Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli

Austeniticko-feritické oceli jsou vhodné pro místa, kde je zapotřebí vysoké pevnosti, odolnosti vůči korozi a/nebo vyšší úrovně odolnosti vůči šterbinové korozi a koroznímu praskání.

Třída 1.4462 je extrémně odolná vůči korozi a je tedy ideální pro použití v přímořském a jiném agresivním prostředí. Rostoucí využívání korozivzdorných ocelí jako nosných částí konstrukce vedlo ke zvýšené poptávce po austeniticko-feritických ocelích a vývoji nových nízkolegovaných austeniticko-feritických tříd (v anglické literatuře označované jako „lean“ duplexní třídy). Tyto nízkolegované

austeniticko-feritické třídy obsahují snížené množství niklu a molybdenu, což má pozitivní vliv na jejich cenu. Zároveň mají podobné mechanické vlastnosti jako třída 1.4462 a jejich korozní odolnost je srovnatelná s austenitickými třídami. To je činí vhodnými pro použití v přímořských podmínkách. Čtyři třídy nízkolegovaných ocelí, které jsou již dostupné, byly v roce 2015 (v ČR pak o rok později) zahrnuty do vydání normy EN 1993-1-4.

Feritické korozivzdorné oceli

Třídy 1.4003 (základní feritická ocel obsahující zhruba 11 % chromu) a 1.4016 (obsahující okolo 16,5 % chromu, dosahující vyšší odolnosti vůči korozi než třída 1.4003) jsou standardními feritickými oceli vhodnými pro využití ve stavebnictví. Svařování třídy 1.4016 ale podstatně snižuje její houževnatost a odolnost vůči korozi.

Moderní stabilizované feritické oceli, například třídy 1.4509 a 1.4521, obsahují legující přísady, jako je niob nebo titan, které vedou k výraznému zlepšení svařitelnosti a možnosti tváření. Třída 1.4521 obsahuje 2 % molybdenu, což vede ke zvýšení odolnosti vůči důlkové a štěrbinové korozi v prostředí obsahujícím chloridy (má podobnou odolnost vůči důlkové korozi jako třída 1.4401). Třída 1.4621 je nedávno vyvinutá feritická ocel obsahující okolo 20 % chromu a její povrch má vyšší leštitelnost v porovnání se třídami 1.4509 a 1.4521.

1.3 Využití korozivzdorných ocelí ve stavebnictví

Korozivzdorné oceli se ve stavebnictví používají již přes sto let, prakticky od doby jejich vynalezení. Výrobky z korozivzdorných ocelí jsou estetické s nízkou náročností na údržbu, odolné vůči korozi a mají dobré mechanické vlastnosti. Dosahují vysokých pevností, mají dobrou houževnatost a odolnost proti únavovému namáhání. Korozivzdorné oceli lze vyrábět pomocí řady technologických postupů a po skončení jejich životnosti jsou plně recyklovatelné. Jsou vhodným materiálem pro aplikaci v agresivních prostředích, včetně budov a konstrukcí v přímořských oblastech, vystavených účinkům posypových solí a na znečištěných místech.

Vysoká tažnost korozivzdorných ocelí je vlastnost žádoucí v místech, kde je vyžadována odolnost vůči seizmickému zatížení, protože umožňuje uvolnění velkého množství energie. Avšak návrh korozivzdorných ocelí na seizmické namáhání není zahrnut v této příručce.

Mezi typické případy využití austenitických a austeniticko-feritických ocelí patří:

- Nosníky, sloupy, plošiny a pomocné konstrukce v zařízeních pro úpravu vody, buničiny a papíru; jaderný, biomasový, chemický, farmaceutický a potravinářský a nápojový průmysl;
- Nosné sloupy a nosníky, bariéry, hrazení, opláštění kabelů a dilatační spáry mostů;
- Hráže, pilíře v moři a další přímořské konstrukce;
- Předpínací betonová výztuž;
- Lehké obvodové pláště, zastřešení, přístřešky, ostění tunelů;
- Pomocné konstrukce lehkých obvodových pláštů, zdiva, ostění tunelů, atd.;
- Bezpečnostní bariéry, zábradlí, pouliční výbava (sloupy, osvětlení, atd.);
- Spojovací a kotevní systémy do dřeva, kamene, zdiva nebo skály;

- Konstrukční a spojovací prvky v budovách plaveckých bazénů (je třeba věnovat zvláštní pozornost částem konstrukce vystaveným atmosféře plaveckého bazénu kvůli riziku vzniku korozního praskání v místech, kde mohou vznikat kondenzáty; viz část 3.5.3);
- Konstrukce odolné proti výbuchu a nárazu, jako jsou bezpečnostní stěny, brány, patníky;
- Konstrukce odolné proti ohni a výbuchu, kabelové žebříky a lávky na ropných plošinách.

Feritické oceli se používají pro opláštění a zastřešení budov. V dopravním odvětví se využívají jako nosné prvky, například trubkový rám autobusu. Rovněž jsou dobře využitelné pro uhelné železniční vagóny, u kterých je důležitá odolnost proti otěru ve vlhkém prostředí. I když v současné době nejsou feritické oceli ve stavebnictví nijak výrazně rozšířeny, mají potenciál pro širší využití jako estetické konstrukční prvky se střední a dlouhodobou životností. U kompozitních konstrukcí s požadavkem na dlouhou životnost nebo vyskytujících se v korozním prostředí nabízejí feritické oceli ekonomičtější řešení než oceli galvanizované, které mohou stěží dosahovat životnosti přesahující 25 let. Kromě kompozitních podlahových systémů jsou feritické oceli vhodnou náhradou dalších výrobků z galvanizovaných ocelí, jako jsou střešní vaznice, ztracené bednění a pomocné konstrukce (například kabelové žebříky). Taktéž mohou být použity v částečně uzavřených nevytápěných prostorách (například železniční nádraží, tribuny a přístřešky pro kola), jako kotevní systémy obvodových plášťů nebo vyztužení zděných konstrukcí a jejich zavětrování.

1.4 Rozsah příručky

Pokyny uvedené v této příručce platí pro základní typy korozivzdorných ocelí využívaných ve stavebnictví. Jsou určeny primárně pro návrh hlavních nosných a sekundárních konstrukčních prvků budov, zařízení na volném moři (například vrtné plošiny) a podobných konstrukcí. Pokyny nejsou určeny pro navrhování speciálních konstrukcí z korozivzdorných ocelí, jako jsou jaderné zařízení nebo tlakové nádoby, pro které již existují příslušné specifické normy.

Tato příručka poskytuje materiálové vlastnosti a pokyny pro návrh prvků (tvářených za studena, válcovaných za tepla a svařovaných) a jejich spojů. Jsou určeny pro austenitické, austeniticko-feritické a feritické oceli. Uvažovány jsou pouze materiály vyrobené válcováním, pokyny se tedy nevztahují na materiály vyrobené odléváním. (Vlastnosti mohou být značně rozdílné, například odlitky austenitických ocelí mohou být mírně magnetické.)

Pokyny v této příručce byly formulovány pomocí metody mezních stavů a v souladu s ustanoveními Eurokódu 3: Části 1-4: *Navrhování nosných konstrukcí, Obecná pravidla – Doplnující pravidla pro korozivzdorné oceli* (EN 1993-1-4), pokud není výslovně uvedeno jinak.

1.5 Značky

Značky používané v této příručce jsou stejné jako v EN 1993-1-1: Eurokód 3: Část 1-1: *Navrhování nosných konstrukcí, Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*.

Rozměry a osy průřezů jsou znázorněny na Obrázku 1.1. Hlavní (tuhá) osa průřezu je obvykle y-y a vedlejší (měkká) osa z-z, viz část 1.6.

Velká písmena latinky

<i>E</i>	Modul pružnosti; účinek zatížení;
<i>F</i>	Zatížení; síla;
<i>G</i>	Modul pružnosti ve smyku;
<i>I</i>	Moment setrvačnosti;
<i>L</i>	Délka; rozpětí; systémová délka;
<i>M</i>	Ohybový moment;
<i>N</i>	Osová síla;
<i>R</i>	Únosnost; odolnost;
<i>V</i>	Smyková síla;
<i>W</i>	Průřezový modul;

Velká písmena řecké abecedy

Δ	Rozdíl v (předchází hlavní symbol);
----------	---

Malá písmena latinky

<i>a</i>	Vzdálenost mezi výztuhami; účinná výška svaru;
<i>b</i>	Šířka;
<i>c</i>	Vzdálenost; šířka nebo výška části průřezu;
<i>d</i>	Průměr; hloubka;
<i>e</i>	Excentricita; posun neutrální osy; vzdálenost k okraji; Vzdálenost od konce;
<i>f</i>	Pevnost (materiálu);
<i>g</i>	Mezera;
<i>h</i>	Výška;
<i>i</i>	Poloměr setrvačnosti; celé číslo;
<i>k</i>	Součinitel; faktor;
<i>l</i>	Vzpěrná délka;
<i>m</i>	Konstanta;
<i>n</i>	Počet; množství (něčeho);
<i>p</i>	Rozteč; vzdálenost;
<i>q</i>	Liniové zatížení;
<i>r</i>	Poloměr; poloměr zaoblení;
<i>s</i>	Rozteč vystřídáních děr; vzdálenost dvou děr v sousedních řadách, měřená rovnoběžně s osou prutu;
<i>t</i>	Tloušťka;
<i>u-u</i>	Hlavní osa největší tuhosti, jestliže není shodná s osou <i>y-y</i> ;
<i>v-v</i>	Hlavní osa nejmenší tuhosti, jestliže není shodná s osou <i>z-z</i> ;
<i>w</i>	Deformace zvlněním;
<i>x-x, y-y, z-z</i>	Osy souřadného systému;

Malá písmena řecké abecedy

α	(alfa) Poměr; součinitel;
β	(beta) Poměr; součinitel;
γ	(gama) Dílčí součinitel;
ε	(epsilon) Deformace; součinitel $\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$
λ	(lambda) Štíhlost (s čarou nad symbolem pak poměrná štíhlost);
ρ	(ró) Součinitel boulení;
σ	(sigma) Normálové napětí;
τ	(tau) Smykové napětí;
φ	(fi) Poměr;
χ	(chi) Redukční součinitel (zohlednění vzpěru a klopení);
ψ	(psi) Poměr napětí a namáhání; redukční součinitel;

Indexy

a	Průměr
b	Otlačení; vzpěr; šroub;
c	Průřez;
cr	Kritický;
d	Návrhový;
E	Euler; vnitřní síla;
eff	Účinný / efektivní;
e	Účinný / efektivní (s dalším indexem);
el	Pružný (elastický);
f	Pásnice;
g	Plný;
i, j, k	Indexy (nahrazeny čísly)
k	Charakteristický;
LT	Klopení;
M	(Beroucí v úvahu) ohybový moment;
N	(Beroucí v úvahu) osovou sílu;
net	Oslabený;
o	Počáteční
p	Smluvní
pl	Plastický
R	Odolnost; únosnost;
r	Snížená hodnota;
S	Sečnový;

s	Tahové napětí (oblast); výztuha;
t	Tah; tahový; kroucení;
u	Hlavní osa průřezu; největší (na mezi pevnosti);
V	(Beroucí v úvahu) smykovou sílu;
v	Smyk; vedlejší osa průřezu;
w	Stojina; svar; deplanace;
x	Podélná osa prutu;
y	Mez kluzu (smluvní); hlavní osa průřezu (kromě nesymetrických průřezů);
z	Vedlejší osa průřezu (kromě nesymetrických průřezů);
σ	Normálové napětí;
τ	Smykové napětí.

Značení

TR	Kruhový uzavřený průřez;
ETR	Eliptický uzavřený průřez;
HTR	Čtyřhranný uzavřený průřez.

1.6 Konvence pro osy prutu

Konvence pro osy prutu je:

$x-x$	podélná osa prutu.
$y-y$	osa průřezu rovnoběžná s pásnicemi nebo s menším ramenem úhelníku.
$z-z$	osa průřezu kolmá k pásnicím nebo k menšímu rameni úhelníku.

V obvyklých případech je osa $y-y$ hlavní osou průřezu (osa větší tuhosti) a osa $z-z$ vedlejší osou (osa menší tuhosti). U úhelníků jsou osy větší a menší tuhosti ($u-u$ a $v-v$) vůči osám $y-y$ a $z-z$ pootočený, viz obrázek 1.1.

Konvence indexů značících orientaci ohybových momentů je:

„Použijte osu, okolo které se ohybový moment otáčí“.

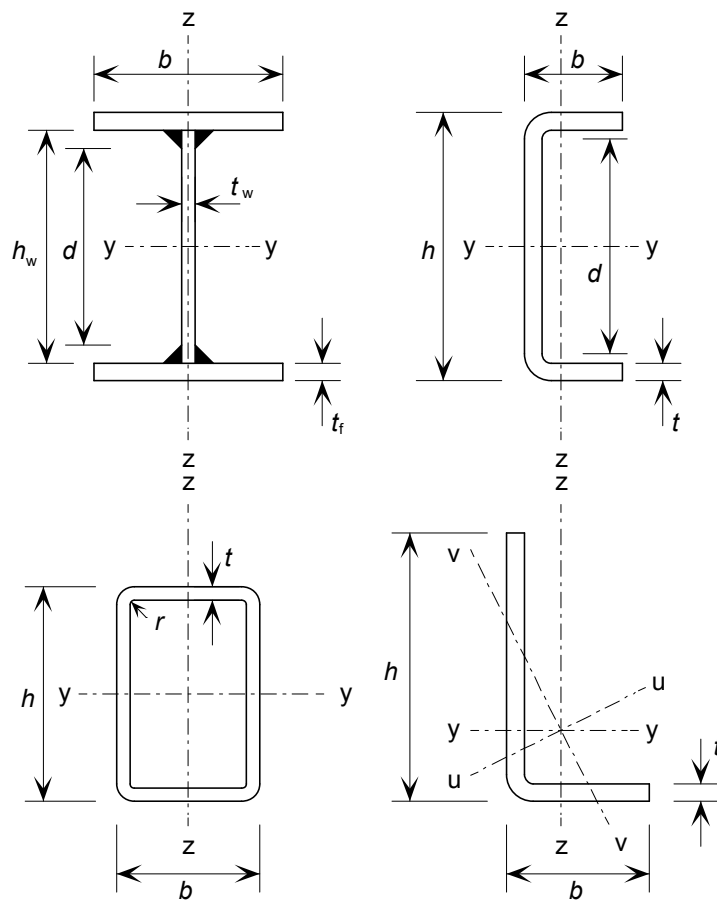
Například ohybový moment působící v rovině stojiny I průřezu je označen jako M_y , protože působí kolem osy rovnoběžné s pásnicemi v příčném řezu.

1.7 Jednotky

Pro výpočet jsou doporučeny následující jednotky:

- Síly a zatížení kN, kN/m, kN/m²;
- Objemová hmotnost kg/m³;
- Objemová tíha kN/m³;
- Napětí a pevnosti N/mm² (= MN/m² nebo MPa);
- Ohybové momenty kNm.

Jako desetinný oddělovač se v příručce, v souladu s evropskými zvyklostmi, používá symbol čárky (,).



Obrázek 1.1 *Rozměry a osy průřezů*

2 VLASTNOSTI KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ

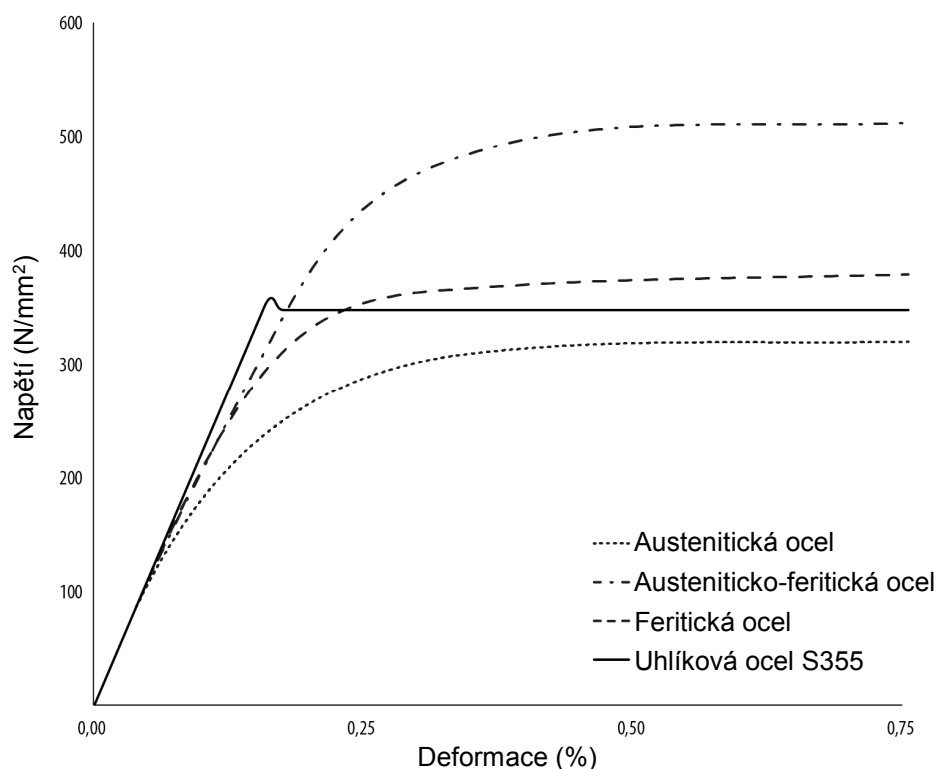
2.1 Základní materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti korozivzdorných ocelí se v mnoha ohledech liší od vlastností ocelí uhlíkových. Nejpodstatnější rozdíl je ve tvaru křivky pracovního diagramu. Zatímco u uhlíkových ocelí pracovní diagram vykazuje lineární pružné chování až do dosažení jasně zřetelné meze kluzu, po které dochází k zpevnění, křivka korozivzdorných ocelí je více zaoblena a bez vyznačení meze kluzu. Na obrázku 2.1 je zobrazeno porovnání pracovních diagramů různých typů korozivzdorných ocelí a uhlíkové oceli pro deformaci do 0,75 % a na obrázku 2.2 až do meze pevnosti. Uvedené křivky pracovních diagramů reprezentují širokou škálu materiálů, zároveň by ale neměly být použity jako podklad pro návrh konstrukce.

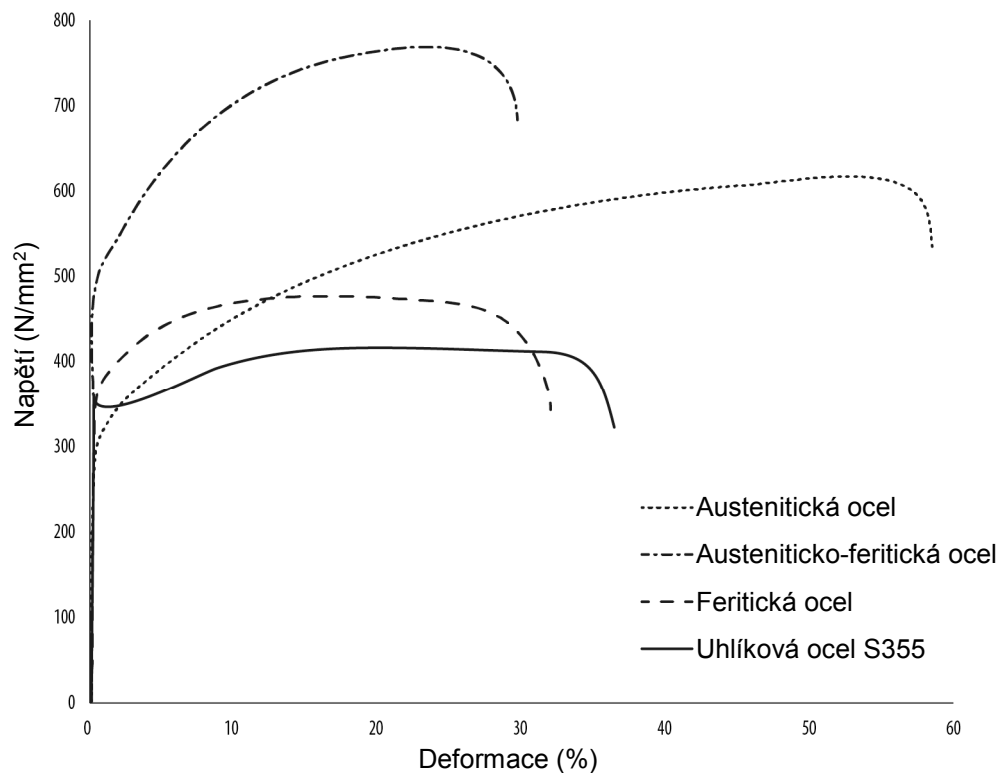
Mez kluzu korozivzdorných ocelí je obecně uváděna jako smluvní mez (velikost napětí) při určité plastické deformaci (obvykle 0,2 %). Graficky je 0,2% smluvní mez kluzu vyobrazena na obrázku 2.3. Mez úměrnosti se pohybuje v rozmezí 40 až 70 % smluvní meze kluzu.

Křivka pracovního diagramu feritické oceli, ležící mezi křivkami austenitické a uhlíkové oceli, nedosahuje takového zakřivení a nelinearity jako austenitická ocel, ale zároveň má vyšší pevnost než uhlíková ocel.

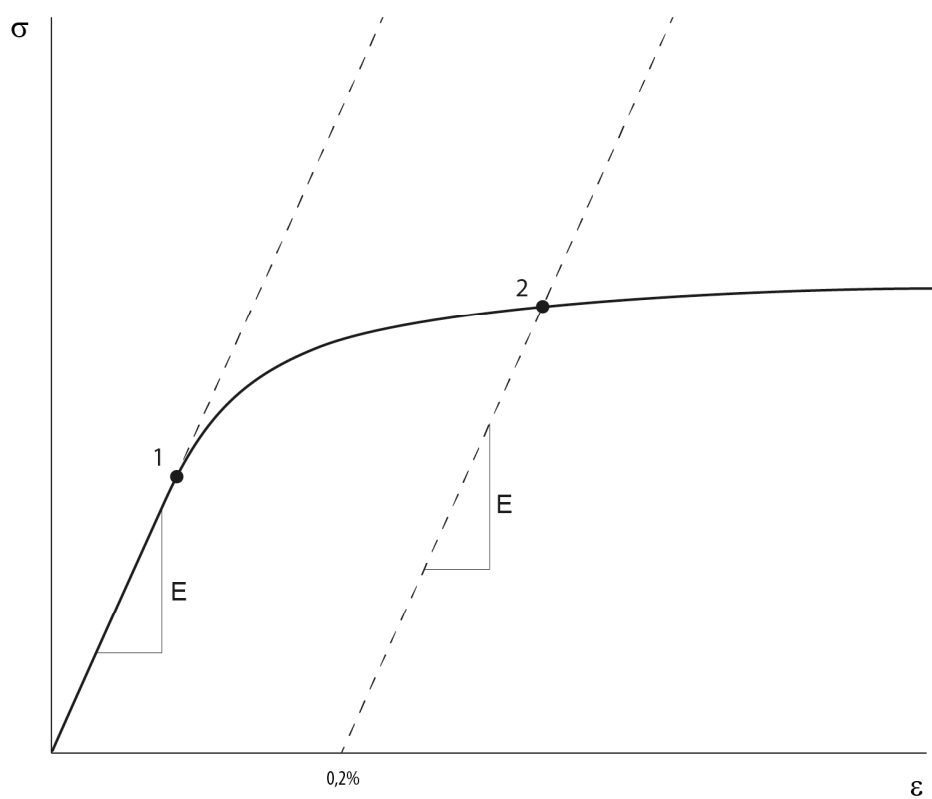
Korozivzdorné oceli mohou, díky skvělé tažnosti (speciálně austenitické oceli) a značnému zpevnění, absorbovat značné zatížení rázem, aniž by došlo k porušení.



Obrázek 2.1 Pracovní diagramy korozivzdorných ocelí a uhlíkové oceli od 0 do 0,75 % deformace



Obrázek 2.2 Celý průběh pracovních diagramů korozivzdorných ocelí a uhlíkové oceli



1. Mez úměrnosti (konec lineární části křivky)
2. Smluvní mez kluzu při 0,2% plastické deformaci

Obrázek 2.3 Definování smluvní meze kluzu

2.2 Faktory ovlivňující materiálové vlastnosti

Ve srovnání s uhlíkovou ocelí je metalurgie korozivzdorných ocelí složitější a proces výroby má vyšší vliv na jejich konečné vlastnosti.

Některé faktory mohou změnit průběh křivky pracovního diagramu jakékoli třídy korozivzdorné oceli. Tyto faktory jsou do jisté míry vzájemně závislé.

2.2.1 Tváření za studena

Korozivzdorná ocel je obvykle dostupná v „žíhaném stavu“. To znamená, že prošla procesem tepelného zpracování, ve kterém byla rozžhavena, po určitou dobu udržována na této teplotě a poté ochlazena. Žihání navrácí materiál do měkkého a tvárného stavu.

Pevnost korozivzdorných ocelí, obzvláště austenitických tříd, je navyšována tvářením za studena (procesy válcování, vyrovnávání a také procesy výroby). S tím se ale pojí snížení tažnosti, které ale, zejména u austenitických ocelí, nemá vzhledem k jejím velkým hodnotám nijak velké důsledky. Pevnosti těchto materiálů jsou uvedeny v tabulce 2.3. Cena za studena zpracované (za účelem zvýšení pevnosti) korozivzdorné oceli je o něco vyšší než ekvivalentní žíhaná korozivzdorná ocel v závislosti na třídě, produktu a úrovni tváření za studena.

Korozivzdorná ocel tvářená za studena zaznamenává nárůst asymetrie chování v tahu a tlaku a začíná vykazovat známky anizotropie (rozdílné vlastnosti ve směru rovnoběžném a kolmém ke směru válcování). Míra asymetrie pracovního diagramu a anizotropie závisí na třídě korozivzdorné oceli, úrovni tváření za studena a způsobu výroby. Konstrukční prvky s tloušťkou nad 3 mm se nevyrábějí z materiálu výrazně tvářeného za studena, a proto nejsou asymetrií ani anizotropií nijak výrazně ovlivněny; větší vliv má klasické nelineární chování materiálu. Asymetrie a anizotropie mají výraznější vliv na konstrukce menších tlouštěk z materiálů výrazně zpracovaných za studena, tedy s vyšší úrovní přetvoření.

U materiálů tvářených za studena je pevnost v tlaku v podélném směru (vůči směru válcování) menší než pevnost v tahu jak v příčném, tak v podélném směru (příslušné pevnosti jsou uvedeny v EN 10088 a také jsou poskytovány výrobcí ocelí). Proto je při výběru návrhové pevnosti za studena tvářeného materiálu nezbytná zvýšená opatrnost (viz tabulka 2.3).

Při výrobě průřezů tvářením za studena dochází ke vzniku plastických deformací, které vedou k výraznému navýšení smluvní meze kluzu. Pevnost se běžně zvyšuje zhruba o 50 % v rozích průřezu; k mírnému navýšení dojde i v rovných částech průřezu. Pokyny jak využít tohoto nárůstu pevnosti jsou shrnuty v Příloze B. Navýšení pevnosti může být prokázáno experimentem (viz kapitola 10).

Následné tepelné zpracování nebo svařování prvku bude mít částečný žihací (změkčující) účinek s následným snížením pevnosti, která byla předtím navýšena během tváření za studena (a také snížením anizotropie). Část 7.4.4 poskytuje návod pro návrh svařovaných spojů mezi prvky vyrobených ze za studena tvářeného materiálu.

2.2.2 Citlivost na rychlost nárůstu deformace

Citlivost na rychlost nárůstu deformace je u korozivzdorných ocelí výraznější než u uhlíkové oceli. To znamená, že korozivzdorné oceli dosáhnou při rychlém nárůstu deformace vyšších pevností než uhlíková ocel.

2.3 Normy a návrhové pevnosti

2.3.1 Ploché a dlouhé výrobky

Informace o vlastnostech a třídách korozivzdorných ocelí jsou obsaženy v normě EN 10088, *Korozivzdorné oceli*. Norma obsahuje pět částí, ze kterých jsou tři podstatné pro využití ve stavebnictví:

- Část 1, *Přehled korozivzdorných ocelí*, poskytuje informace o chemickém složení a o některých referenčních fyzikálních vlastnostech, jako je modul pružnosti E ;
- Část 4, *Technické dodací podmínky pro plech a pás z ocelí odolných korozi pro použití ve stavebnictví*, poskytuje údaje o technických vlastnostech a chemickém složení materiálů používaných pro tvorbu konstrukčních prvků;
- Část 5, *Technické dodací podmínky pro tyče, drát, profily a lesklé výrobky z ocelí odolných korozi pro použití ve stavebnictví*, poskytuje údaje o technických vlastnostech a chemickém složení materiálů používaných pro výrobu dlouhých produktů (tyčí, drátů a pod.).

EN 1008, části 4 a 5 jsou harmonizované normy, a proto korozivzdorná ocel specifikovaná v této normě musí mít označení CE. Označením produktu značkou CE výrobce prohlašuje, že je produkt vhodný pro příslušné využití. Výrobek s označením CE je v souladu s příslušnou normou a splňuje všechny stanovené prahové hodnoty požadované touto normou (například minimální tloušťka nebo pevnost). Označení CE také zaručuje dodržení postupů posuzování shody.

Značení a složení

Systém značení je převzat z EN 10088 a obsahuje evropské číslo oceli a značku oceli.

Například, třída 304L má číslo oceli 1.4307, kde:

1.	43	07
Značí ocel	Značí třídu korozivzdorné oceli	Identifikuje jednotlivou podtřídu

Skupiny korozivzdorných ocelí jsou značeny dle EN 10027-2:

1.40XX	Korozivzdorná ocel s Ni < 2,5 % bez Mo, Nb a Ti
1.41XX	Korozivzdorná ocel s Ni < 2,5 % a Mo ale bez Nb a Ti
1.43XX	Korozivzdorná ocel s Ni ≥ 2,5 % ale bez Mo, Nb a Ti
1.44XX	Korozivzdorná ocel s Ni ≥ 2,5 %, a Mo ale bez Nb a Ti
1.45XX	Korozivzdorná ocel se speciálními přísadami
1.46XX	Chemicky odolné a vysoce temperované třídy s Ni

Značka korozivzdorné oceli poskytuje některé informace o jejím materiálovém složení. Ocel s číslem 1.4307 má značku X2CrNi18-9 a obsahuje:

X	2	CrNi	18-9
Značí vysoce legovanou ocel	100 x % uhlíku	Chemické značky hlavních legujících prvků	% hlavních legujících prvků

Každé číselné označení korozivzdorné oceli má i příslušnou značku. V Příloze A je poskytnuto značení ekvivalentních tříd korozivzdorných ocelí v evropských a amerických normách.

Chemické složení běžných korozivzdorných ocelí je uvedeno v tabulce 2.1.

Pevnost

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). 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.

Hodnota naměřeného napětí na mezi kluzu plechů o tloušťce do 25 mm z austenitických ocelí může překročit stanovené minimální hodnoty, a to o 25 až 40 %. V případě austeniticko-feritických ocelí zhruba o 5 až 20 %. Existuje inverzní vztah mezi tloušťkou nebo průměrem a mezí kluzu. Hodnota meze kluzu nižších tloušťek je obvykle výrazně vyšší, než je minimální stanovená, zatímco u tloušťek 25 mm a více se naopak minimální stanovené hodnotě přibližuje.

U konstrukcí vystavených tepelným klimatickým vlivům je třeba vzít v úvahu maximální teplotu, kterou korozivzdorná ocel může dosáhnout. U malých a chráněných částí konstrukcí není třeba brát tepelné namáhání v úvahu. V případech velkých konstrukcí, které mají velkou plochu vystavenou přímému slunečnímu svitu, mohou tyto části dosáhnout teploty až o 50 % vyšší, než je teplota okolní. K určení historických meteorologických podmínek mohou být použity zdroje, jako je například www.weatherbase.com. Pokud je pravděpodobné, že teplota korozivzdorné oceli dosáhne 60 °C, je nutné snížit uvažovanou mez kluzu při pokojové teplotě o 5 %. Při riziku dosažení vyšších teplot je zapotřebí ještě většího snížení.

Tabulka 2.1 Chemické složení podle EN 10088

Typ	Třída	Množství legujících prvků (maximální nebo možný rozsah) v %				
		C	Cr	Ni	Mo	Ostatní
Austenitické oceli	1.4301	0,07	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4307	0,03	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4401	0,07	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4318	0,03	16,5 – 18,5	6,0 - 8,0		N: 0,1 – 0,2
	1.4404	0,03	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4541	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0		Ti: 5xC – 0,7 ¹
	1.4571	0,08	16,5 – 18,5	10,5 – 13,5	2,0 – 2,5	Ti: 5xC – 0,7 ¹
Austeniticko-ferritické oceli	1.4062	0,03	21,5 – 24,0	1,0 – 2,9	0,45	N: 0,16 – 0,28
	1.4162	0,04	21,0 – 22,0	1,35 – 1,7	0,1 – 0,8	N: 0,2 – 0,25 Cu: 0,1 – 0,8
	1.4362	0,03	22,0 – 24,0	3,5 – 5,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2 Cu: 0,1 – 0,6
	1.4462	0,03	21,0 – 23,0	4,5 – 6,5	2,5 – 3,5	N: 0,1 – 0,22
	1.4482	0,03	19,5 – 21,5	1,5 – 3,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2 Cu: 1,0
	1.4662	0,03	23,0 – 25,0	3,0 – 4,5	1,0 – 2,0	N: 0,2 – 0,3 Cu: 0,1 – 0,8
Ferritické oceli	1.4003	0,03	10,5 – 12,5	0,3 – 1,0	-	
	1.4016	0,08	16,0 – 18,0	-	-	
	1.4509	0,03	17,5 – 18,5	-	-	Ti: 0,1 – 0,6 Nb: [3xC+0,3] – 1,0
	1.4521	0,025	17,0 – 20,0	-	1,8 – 2,5	Ti: [4x(C+N)+0,15] – 0,8 ²
	1.4621	0,03	20,0 – 21,5	-	-	N: 0,03 Nb: 0,2 – 1,0 Cu: 0,1 – 1,0
<p>Poznámka:</p> <p>¹ Titan se přidává za účelem stabilizace uhlíku a kvůli zlepšení protikorozních vlastností v tepelně ovlivněných zónách svarů. Nicméně, s výjimkou prvků masivních průřezů, využití austenitických ocelí stabilizovaných příměsí titanu bylo převážně nahrazeno dostupností nízkouhlíkových tříd 1.4307 a 1.4404.</p> <p>² Stabilizace korozivzdorné oceli lze dosáhnout pomocí titanu, niobu nebo zirkonu. S ohledem na atomovou hmotnost těchto prvků a na obsah uhlíku a dusíku, je ekvivalentem následující: Nb (hmotnostní %) = Zr (hmotnostní %) = 7/4 Ti (hmotnostní %)</p>						

Tabulka 2.2 Jmenovité hodnoty meze kluzu f_y a meze pevnosti v tahu f_u konstrukčních korozivzdorných ocelí podle EN 10088 (N/mm²)

Typ	Třída	Druh výrobku							
		Pás válcovaný za studena		Pás válcovaný za tepla		Plech válcovaný za tepla		Tyče a průřezy	
		Jmenovitá tloušťka t							
		$t \leq 8$ mm		$t \leq 13,5$ mm		$t \leq 75$ mm		t nebo $\phi \leq 250$ mm	
		f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u
Austenitické oceli	1.4301	230	540	210	520	210	520	190	500
	1.4307	220	520	200	520	200	500	175	500
	1.4318	350	650	330	650	330	630	-	-
	1.4401	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4404	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4541	220	520	200	520	200	500	190	500
	1.4571	240	540	220	540	220	520	200	500
Austeniticko-ferritické oceli	1.4062	530 ¹	700 ¹	480 ²	680 ²	450	650	380 ³	650 ³
	1.4162	530 ¹	700 ¹	480 ²	680 ²	450	650	450 ³	650 ³
	1.4362	450	650	400	650	400	630	400 ³	600 ³
	1.4462	500	700	460	700	460	640	450 ³	650 ³
	1.4482	500 ¹	700 ¹	480 ²	660 ²	450	650	400 ³	650 ³
	1.4662	550 ¹	750 ¹	550 ⁴	750 ⁴	480	680	450 ³	650 ³
Ferritické oceli	1.4003	280	450	280	450	250 ⁵	450 ⁵	260 ⁶	450 ⁶
	1.4016	260	450	240	450	240 ⁵	430 ⁵	240 ⁶	400 ⁶
	1.4509	230	430	-	-	-	-	200 ⁷	420 ³
	1.4521	300	420	280	400	280 ⁸	420 ⁸	-	-
	1.4621	230 ⁵	400 ⁹	230 ⁸	400 ⁸	-	-	240 ⁷	420 ⁷

Jmenovité hodnoty f_y a f_u uvedené v této tabulce se mohou použít při navrhování bez uvažování anizotropie nebo účinků zpevnění. Hodnoty f_y ferritických ocelí jsou uvedeny v EN 10088-4 pro podélný i příčný směr. V této tabulce jsou uvedeny pouze hodnoty podélného směru, které jsou zhruba o 20 N/mm² nižší než v příčném směru.

Třídy 1.4621, 1.4482, 1.4062 a 1.4662 jsou zahrnuty pouze v normách EN 10088-2 a 3.
Tyče třídy 1.4509 jsou zahrnuty pouze v normě EN 10088-3.

¹ $t \leq 6,4$ mm	⁴ $t \leq 13$ mm	⁷ t nebo $\phi \leq 50$ mm
² $t \leq 10$ mm	⁵ $t \leq 25$ mm	⁸ $t \leq 12$ mm
³ t nebo $\phi \leq 160$ mm	⁶ t nebo $\phi \leq 100$ mm	⁹ $t \leq 6$ mm

Korozivzdorné oceli tvářené za studena mohou být značeny podle EN 10088 buď na základě 0,2% smluvní meze kluzu (například zpracování CP350, CP500, apod.) nebo meze pevnosti (například zpracování C700, C850, apod.), uvést lze ale pouze jeden údaj. Vzhledem k tomu, že konstrukční návrh téměř vždy vyžaduje minimální specifikovanou hodnotu meze kluzu f_y , norma EN 1993-1-4 proto umožňuje návrh konstrukce z korozivzdorných ocelí pouze ve zpracování CP350 a CP500 (tabulka 2.3). Charakteristická hodnota meze kluzu f_y je považována za minimální specifikovanou hodnotu 350 N/mm² pro materiál ve zpracování CP350. Kvůli zohlednění asymetrie za studena tvářeného materiálu v případech, kdy dojde k namáhání tlakem v podélném směru válcování (například sloup nebo ohýbaný nosník), se charakteristická hodnota meze kluzu oceli CP500 redukuje z 500

na 460 N/mm² (viz část 2.2). Na základě experimentálně získaných dat může být použita vyšší hodnota.

U za studena tvářených ocelí ve zpracování vyšším než CP500 by měla být hodnota meze kluzu stanovena na základě experimentu provedeného podle kapitoly 10.

Čtyřhranné uzavřené průřezy (HTR) jsou k dispozici ve zpracování do hodnot středních pevností, mezi CP350 a CP500, s výrobcem garantovanými hodnotami meze kluzu a pevnosti (mez kluzu je stejná jak v tahu, tak v tlaku).

Tabulka 2.3 *Jmenovité hodnoty meze kluzu f_y a meze pevnosti v tahu f_u za studena tvářených konstrukčních korozivzdorných ocelí podle EN 10088*

Třída	Zpracování za studena			
	CP350		CP500	
	f_y N/mm ²	f_u ¹ N/mm ²	f_y N/mm ²	f_u ¹ N/mm ²
1.4301	350	600	460	650
1.4318	²	²	460	650
1.4541	350	600	460	650
1.4401	350	600	460	650
1.4571	350	600	460	650

¹ Podle EN 10088 definuje klasifikace CP pouze požadované napětí při poměrné plastické deformaci 0,2 %, f_y (smluvní mez kluzu). Uvedené oceli musí mít deklarované vlastnosti, které splňují konzervativní hodnoty meze pevnosti v tahu f_u uvedené v tabulce, pokud se typovými zkouškami neprokáže přípustnost jiných hodnot.

² Třída 1.4318 dosahuje napětí při poměrné plastické deformaci 0,2 % (smluvní mez kluzu) o hodnotě 350 N/mm² v žíhaném stavu; viz tabulka 2.2.

Modul pružnosti

Pro konstrukční návrh se doporučuje uvažovat hodnotu 200×10^3 N/mm² pro všechny třídy korozivzdorných ocelí.

Normy EN 1993-1-4 a EN 10088-1 udávají 200×10^3 N/mm² jako hodnotu modulu pružnosti pro všechny standardní austenitické a austeniticko-feritické oceli využívané ve stavebnictví. Pro feritické oceli udávají hodnotu 220×10^3 N/mm². Dostupné experimentální údaje však ukazují, že hodnota 200×10^3 N/mm² je přesnější, a proto se očekává, že v příštím vydání normy EN 1993-1-4 bude pro navrhování doporučena tato hodnota.

Pro stanovení průhybu je vhodnější využít sečnový modul pružnosti, viz část 6.4.6. Hodnota Poissonovy konstanty pro korozivzdornou ocel může být uvažována jako 0,3 a smykový modul pružnosti G jako $76,9 \times 10^3$ N/mm².

2.3.2 Uzavřené průřezy

Pro kruhové uzavřené průřezy z korozivzdorných ocelí existují dvě normy, které poskytují informace o technických vlastnostech a chemickém složení:

EN 10296-2 *Svařované ocelové trubky kruhového průřezu pro strojírenství a všeobecné technické použití – Technické dodací podmínky. Část 2: Korozivzdorné oceli*

Pro čtyřhranné uzavřené průřezy z korozivzdorných ocelí neexistuje ekvivalentní norma.

Norma zahrnující uzavřené průřezy z korozivzdorných ocelí (jak kruhové, tak čtyřhranné) pro stavební využití je v současné době teprve připravována. Jelikož tato norma zatím není k dispozici, obvykle se pro získání informací o složení a pevnosti využívá norma EN 10088 a pro hodnoty tolerancí příslušná norma pro uzavřené průřezy z uhlíkové oceli.

2.3.3 Šrouby

Šrouby z korozivzdorných ocelí jsou zahrnuty v normě EN 3506, *Spojovací součásti. Spojovací součásti z korozivzdorných ocelí. Technické požadavky*. Následující informace se týkají revize normy EN 3506, která má být zveřejněna v roce 2017. Norma uvádí chemické složení a mechanické vlastnosti spojovacích prvků z austenitických, martenzitických, feritických a austeniticko-feritických ocelí. Alternativní materiály, které nejsou v normě zahrnuty, jsou přípustné, pokud splňují požadavky na fyzikální a mechanické vlastnosti a mají ekvivalentní odolnost vůči korozi.

Tabulka 2.4 Chemické složení šroubů dle EN ISO 3506

Typ	Skup.	Chemické složení ^a množství v %										Ostatní prvky a poznámky
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N	
Austenitická ocel	A1	0,12	1,0	6,5	0,020	0,15-0,35	16-19	0,7	5-10	1,75-2,25	—	b, c, d
	A2	0,10	1,0	2,0	0,050	0,03	15-20	— ^e	8-19	4	—	f, g
	A3	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	17-19	— ^e	9-12	1	—	5C ≤ Ti ≤ 0,8 a/nebo 10C ≤ Nb ≤ 1,0
	A4	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	16-18,5	2,0-3,0	10-15	4	—	g, h
	A5	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	16-18,5	2,0-3,0	10,5-14	1	—	5C ≤ Ti ≤ 0,8 a/nebo 10C ≤ Nb ≤ 1,0 h
	A8	0,03	1,0	2,0	0,040	0,03	19-22	6,0-7,0	17,5-26	1,5	—	—
Aust.-feritická ocel	D2	0,04	1,0	6,0	0,040	0,030	19-24	0,10-1,0	1,5-5,5	3	0,05-0,20	Cr+3,3Mo+16N ≤24 ⁱ
	D4	0,04	1,0	6,0	0,040	0,030	21-25	0,10-2,0	1,0-5,5	3	0,05-0,30	24 < Cr+3,3Mo+16N ⁱ
	D6	0,03	1,0	2,0	0,040	0,015	21-26	2,5-3,5	4,5-7,5	—	0,08-0,35	—
	D8	0,03	1,0	2,0	0,035	0,015	24-26	3,0-4,5	6,0-8,0	2,5	0,20-0,35	W ≤ 1,0

^a Hodnoty jsou maximální, pokud není uvedeno jinak.
^b Selen může být použit jako náhrada síry, nicméně je nutné vzít v úvahu vnitrostátní předpisy příslušných zemí a regionů.
^c Je-li obsah niklu menší než 8 %, obsah manganu musí být minimálně 5 %.
^d Pokud je obsah niklu vyšší než 8 %, minimální hodnota obsahu uhlíku není limitována.
^e Molybden může být obsažen podle uvážení výrobce. Pokud je však v některých případech nutné omezení obsahu molybdenu, kupující o tom musí být jasně informován.
^f Je-li obsah chromu menší než 17 %, obsah niklu musí být minimálně 12 %.
^g U austenitických korozivzdorných ocelí obsahujících nejvýše 0,03 % uhlíku může být obsažen také dusík, ale jeho obsah nesmí být vyšší než 0,22 %.
^h Je-li nutné dosažení specifikovaných mechanických vlastností při větších průměrech, výrobce dle uvážení může navýšit obsah uhlíku, ale u austenitických ocelí nesmí být vyšší než 0,12 %.
ⁱ Vzorec je využíván pro klasifikaci austeniticko-feritických ocelí v souladu s touto normou; není určen k použití jako kritérium výběru stupně odolnosti vůči korozi.

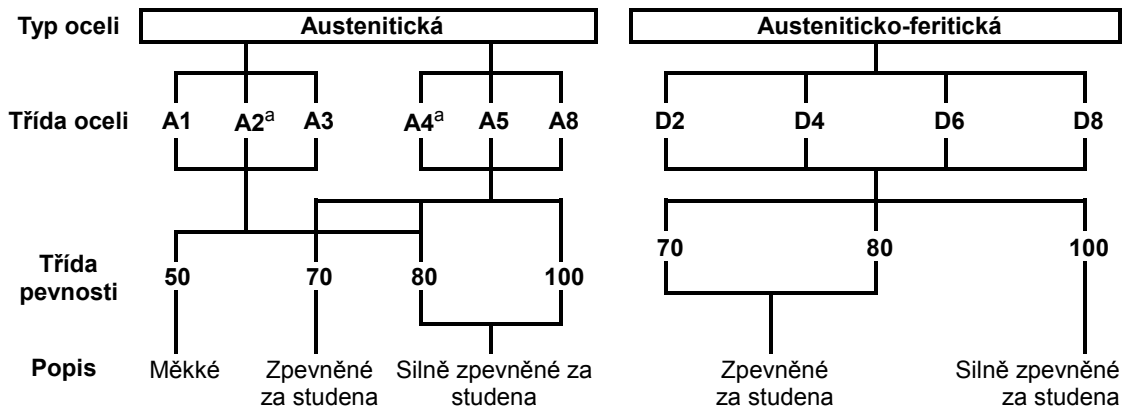
Značení šroubů a matic v normě EN 3506 je provedeno pomocí písmen: „A“ pro austenitické, „F“ pro feritické, „C“ pro martenzitické a „D“ pro austeniticko-feritické. Pro využití ve stavebnictví jsou doporučeny spojovací prvky z austenitické nebo austeniticko-feritické oceli. Za písmenem následuje číslo (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 nebo 8) které značí úroveň odolnosti vůči korozi; 1 značí nejmenší odolnost a 8 největší odolnost. Tabulka 2.4 poskytuje informace o chemickém složení šroubů z austenitických a austeniticko-feritických ocelí. Tabulka 2.5 uvádí běžné značení korozivzdorných ocelí používaných pro spojovací prvky všech tříd.

Tabulka 2.5 Označení korozivzdorných ocelí používaných pro spojovací prostředky

Typ oceli	ISO 3506 třída	Třídy korozivzdorných ocelí používaných pro spojovací prostředky	Komentáře
Austenitická	A1	1.4570, 1.4305	Určené pro obrábění ¹
	A2	1.4301, 1.4307	Základní austenitické
	A3	1.4541, 1.4550	Stabilizované základní austenitické
	A4	1.4401, 1.4404	Austenitické obsahující molybden
	A5	1.4571	Stabilizované austenitické obsahující molybden
	A8	1.4529, 1.4547	Super austenitické
Austeniticko-feritická	D2	1.4482, 1.4362	Nízkolegované austeniticko-feritické
	D4	1.4162, 1.4062	Nízkolegované austeniticko-feritické
	D6	1.4462	Standardní austeniticko-feritické
	D8	1.4410, 1.4501, 1.4507	Super austeniticko-feritické

¹ Vysoký obsah síry snižuje odolnost vůči korozi ve srovnání s odpovídajícími ocelmi s normálním obsahem síry. Využívejte opatrně.

Obrázek 2.4 znázorňuje systém značení a třídy pevnosti dostupných spojovacích prvků z austenitických a austeniticko-feritických ocelí. Rozdíly v mechanických vlastnostech jsou způsobeny zpevněním a závisí na úrovni tváření za studena. Tabulka 2.6 udává mechanické vlastnosti jednotlivých skupin. Šrouby z austenitické oceli do třídy pevnosti 50 nejsou magnetické, avšak vyšší třídy mohou vykazovat některé magnetické vlastnosti.



a Nízkouhlíkové austenitické oceli s obsahem uhlíku nepřesahujícím 0,03 % mohou být dodatečně označeny značkou „L“ za označením skupiny. Příklad: **A4L-80**.

Obrázek 2.4 Systém značení skupin a tříd pevností spojovacích prvků z korozivzdorných ocelí

Slitina šroubu třídy pevnosti 50 je měkká. Šrouby třídy pevnosti 70 jsou vyrobeny z tyče tažené za studena a šrouby třídy pevnosti 80 z částečně zpevněné tyče tažené za studena. Tváření za studena může mít vliv na odolnost vůči korozi. Šrouby pevnostní třídy 50 s vyfrézovanými závity jsou náchylnější k poškození závitu, viz část 11.7.

Odolnost vůči korozi ocelí spojovacích prvků by měla být přinejmenším stejná, jakou má spojovaný materiál. Například šrouby třídy oceli A2 (nebo vyšší) mohou být použity pro spojování prvků z oceli 1.4301, ale pro spojování prvků z oceli 1.4401 by měly být použity šrouby třídy oceli A4 (nebo vyšší).

Pro výpočet únosnosti šroubů v tahu, smyku nebo kombinaci tahu a smyku by se hodnota základní pevnosti f_{ub} měla pro příslušné třídy pevnosti považovat za minimální stanovenou tahovou pevnost R_m udanou v tabulce 2.6.

Vodíkové křehnutí nenastává u ocelí austenitických ani austeniticko-feritických, které se vyrábějí a používají v souladu se standardním opatřením pro kontrolu kvality. Tento jev nastal pouze v několika případech u austeniticko-feritických ocelí a byl spojen se špatnou výrobní kontrolou nebo s nevhodnými provozními podmínkami. Možnost vzniku vodíkového křehnutí by mělo být posouzeno u prvků s vysokou pevností, jako jsou šrouby s třídou pevnosti 80 a vyšší.

Tabulka 2.6 Minimální specifikované mechanické vlastnosti šroubů, vrtů a čepů z austenitických a austeniticko-feritických ocelí

Třída oceli	Třída oceli	Třída pevnosti	Tahová pevnost, R_m MPa	Napětí na 0,2 % plastické deformace, R_{pf} MPa	Prodloužení při porušení mm
Austenitická	A1, A2, A3, A5	50	500	210	0,6 d
		70	700	450	0,4 d
		80	800	600	0,3 d
	A4	50	500	210	0,6 d
		70	700	450	0,4 d
		80	800	600	0,3 d
		100	1000	800	0,2 d
	A8	70	700	450	0,4 d
		80	800	600	0,3 d
		100	1000	800	0,2 d
Austeniticko-feritická	D2, D4 D6, D8	70	700	450	0,4 d
		80	800	600	0,3 d
		100	1000	800	0,2 d

2.3.4 Lomová houževnatost

Austenitické korozivzdorné oceli nedosahují přechodu z tvárného na křehký lom; jejich houževnatost se snižuje s klesající teplotou. Obvykle se využívají pro kryogenní využití. Vykazují adekvátní houževnatost při provozních teplotách dosahujících až $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Austeniticko-feritické a feritické korozivzdorné oceli dosahují přechodu chování z houževnatého na křehké. Nízkolegované austeniticko-feritické oceli vykazují adekvátní houževnatost při provozních teplotách dosahujících až $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ještě lepší houževnatost vykazují vysoce legované austeniticko-feritické oceli, například 1.4462.

Z experimentálně získaných dat vyplývá, že feritické oceli při minimálních provozních teplotách v interiérech, zůstávají duktilní. Třída 1.4003 má modifikovanou mikrostrukturu, díky čemu dosahuje výrazně vyšší houževnatosti než ostatní feritické třídy a bude pravděpodobně z feritických tříd nejvhodnější pro využití u silnostěnných průřezů. Třída 1.4016 se nedoporučuje používat v tloušťkách nad 3 mm při provozní teplotě nižší než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro třídy 1.4509, 1.4521 a 1.4621 je pro teploty nižší než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ maximální doporučená tloušťka 2 mm.

Nejsou zaznamenány žádné údaje, které by naznačovaly, že u korozivzdorných ocelí dochází k lamelárnímu praskání.

2.4 Fyzikální vlastnosti

Tabulka 2.7 udává fyzikální vlastnosti korozivzdorných ocelí zahrnutých v této příručce při pokojové teplotě v žíhaném stavu. Fyzikální vlastnosti se mohou mírně lišit v závislosti na druhu a velikosti produktu, avšak tyto změny obvykle nejsou pro návrh důležité.

Tabulka 2.7 Fyzikální vlastnosti při pokojové teplotě, žíhaný stav

Typ oceli	Třída	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Tepelná roztažnost 20 – 100°C (10 ⁻⁶ /°C)	Tepelná vodivost (W/m°C)	Měrná tepelná kapacita (J/kg°C)
Austenitická	1.4301	7900	16	15	500
	1.4307	7900	16	15	500
	1.4401	8000	16	15	500
	1.4318	7900	16	15	500
	1.4404	8000	16	15	500
	1.4541	7900	16	15	500
	1.4571	8000	16,5	15	500
Austeniticko-feritická	1.4062	7800	13	15	480
	1.4162	7700	13	15	500
	1.4362	7800	13	15	500
	1.4482	7800	13	13	500
	1.4462	7800	13	15	500
	1.4662	7700	13	15	500
Feritická	1.4003	7700	10,4	25	430
	1.4016	7700	10	25	460
	1.4509	7700	10	25	460
	1.4521	7700	10,4	23	430
	1.4621	7700	10	21	460
Uhlíková	S355	7850	12	53	440

Všimněte si, že tepelná roztažnost austenitických ocelí je zhruba o 30 % větší, než tepelná roztažnost uhlíkové oceli. Pokud se v konstrukci vyskytne kombinace austenitické a uhlíkové oceli, jejich rozdílná tepelná roztažnost by měla být zohledněna v návrhu. Tepelná vodivost austenitických a austeniticko-feritických ocelí dosahuje zhruba 30 % hodnoty tepelné vodivosti uhlíkové oceli. Feritické oceli mají vyšší tepelnou vodivost, zhruba 50 % hodnoty tepelné vodivosti uhlíkové oceli. Tepelná roztažnost feritických ocelí je výrazně nižší než u ocelí austenitických a je přibližně stejná jako u uhlíkové oceli.

Austeniticko-feritické a feritické oceli jsou magnetické, zatímco žíhané austenitické oceli prakticky nikoli. V případech, kdy je zapotřebí extrémně malé magnetické propustnosti, jsou k dispozici speciální třídy austenitické oceli. Je ale třeba vhodného výběru svařovacího materiálu, kvůli možnému vzniku feritu ve svaru. Takové svařovací materiály umožní 100% austenitické ztuhnutí v místě svaru. Magnetickou propustnost může zvýšit, zejména u nízkolegovaných austenitických ocelí, vyšší úroveň zpracování za studena; následné žíhání by obnovilo původní magnetické vlastnosti.

2.5 Vliv teploty

Austenitické oceli se používají pro kryogenní aplikace. Na druhém konci teplotní stupnice si austenitické oceli zachovávají vyšší pevnost při teplotách nad 550 °C než ocel uhlíková. Nicméně návrh konstrukcí dlouhodobě vystaveným kryogenním nebo naopak extrémně vysokým teplotám není zahrnut v této příručce. Stačí zdůraznit, že další mechanické vlastnosti a další druhy koroze, než ty které jsou uvedeny v kapitole 3, mají na návrh velký vliv. Pro aplikaci ve velmi vysokých teplotách jsou většinou vhodnější jiné druhy korozivzdorných ocelí než ty, které jsou uvedeny v této příručce, a pro samotný návrh je třeba vyhledat další návrhová doporučení.

Austeniticko-feritické oceli by neměly být dlouhodobě vystaveny teplotám nad 250 – 300 °C kvůli možnému křehnutí.

Kapitola 8 se zabývá návrhem konstrukce za požáru a jsou v ní uvedeny mechanické a fyzikální vlastnosti korozivzdorných ocelí při vysokých teplotách.

2.6 Zinkování a kontakt s roztaveným zinkem

Žárové zinkování ponorem není u prvků z korozivzdorných ocelí povoleno, protože kontakt s roztaveným zinkem může způsobit zkřehnutí materiálu. Je třeba dbát na to, aby v případě požáru nemohl roztavený zinek z pozinkované oceli odkapávat nebo stéci na prvek z korozivzdorné oceli a způsobit křehnutí. Nebezpečí křehnutí také hrozí v případě, kdy je prvek z korozivzdorné oceli připojen k prvku z uhlíkové oceli, který je následně zinkován ponorem.

2.7 Dostupné produkty

2.7.1 Nejčastější typy produktů

Výrobky z plechů, desek a tyče z korozivzdorných ocelí jsou běžně dostupné a jsou zahrnuty v této příručce. V případě feritických ocelí jsou dostupné obvykle v tloušťkách do 4 mm.

Trubky jsou dostupné ve všech třídách austenitických ocelí a některých austeniticko-feritických, jako jsou 1.4462 a 1.4162. Trubkové průřezy jsou běžně dostupné také v běžných třídách feritické oceli 1.4003 a 1.4016. Pro využití ve stavebnictví se obvykle používají trubky tvarované (válcované) za studena, ale dostupné jsou také válcované za tepla. Čtyřhranné uzavřené průřezy mohou být také vyrobeny svařením dvou U průřezů.

Prvky otevřených průřezů se obvykle vyrábějí tvářením za studena, svařováním (obloukovým nebo laserem) nebo protlačováním. Značné množství úhelníků, U průřezů, I průřezů a T průřezů je dostupné ve stejných dimenzích jako klasické průřezy z uhlíkové oceli (například IPE, IPN, apod.); průřezy menších dimenzí jsou válcovány za tepla a ty větších dimenzí jsou svařovány. K dispozici jsou ve standardních třídách austenitické oceli 1.4301 a 1.4401; austeniticko-feritické třídy obvykle vyžadují zvláštní objednávku. Průřezy válcované za tepla jsou dostupné pouze v třídách 1.4301 a 1.4401.

Rozměry standardních uzavřených a otevřených průřezů jsou uvedeny v návrhovém softwaru a mobilních aplikacích (k dispozici na adrese www.steel-stainless.org/designmanual).

Materiál tvářený za studena je k dispozici ve standardních austenitických třídách v různých formách, zahrnující plechy, desky, cívky, pásy, tyče a uzavřené průřezy:

- Plechy, desky, cívky, pásy (v typických tloušťkách $\leq 6,0$ mm);

- Kulaté tyče (průměr od 5 mm do 60 mm);
- Čtyřhranné uzavřené průřezy (rozměry průřezů do 400 mm, tloušťek od 1,2 do 12 mm).

2.7.2 Tváření za studena

Je důležité, aby proběhla diskuse s výrobcem ohledně limitů výroby průřezů tvářením za studena z plechů větších tloušťek válcovaných za tepla. Korozivzdorné oceli mají ve srovnání s uhlíkovou ocelí jiné pružné vlastnosti a jejich tváření vyžaduje větší zatížení. Délka za studena lisovaných prvků je omezena rozměry lisu nebo, v případě tlustších nebo pevnějších materiálů, výkonem lisu. Austeniticko-feritické oceli vyžadují přibližně dvojnásobek tvarovacího zatížení použitého pro austenitické oceli, v důsledku toho je rozsah prvků z austeniticko-feritických ocelí užší, avšak díky jejich vyšší pevnosti mohou být průřezy subtilnější. Navíc by kvůli nižší tažnosti austeniticko-feritických ocelí měly být při tvarování za studena použity větší poloměry ohýbání. Subtilní uzavřené průřezy jsou obvykle vyráběny válcováním a následným svařováním. Za tepla válcované plechy z austenitické oceli tloušťek do 13 mm mohou být za studena tvářeny a mohou z nich být zhotoveny konstrukční průřezy, jako jsou například úhelníky. Další informace jsou v části 11.5.2.

2.7.3 Válcování za tepla

Desky z korozivzdorných ocelí, které jsou příliš tlusté pro tváření za studena, se zahřívají a válcují do finálního tvaru. Tato metoda je finančně efektivnější při větších zakázkách a sériové výrobě. K výrobě prvků středních a velkých rozměrů slouží desky se širokou škálou tloušťek a šířek. Úhelníky a U průřezy jsou běžně vyráběny válcováním za tepla. Tato technologie může být kombinována se svařováním za účelem vytvoření konstrukčního průřezu. Například svařením dvou U průřezů se vytvoří I průřez. Masivní uzavřené průřezy jsou obvykle vyráběny válcováním za tepla a následným svařováním.

2.7.4 Protlačování

Protlačované průřezy z korozivzdorné oceli jsou vyráběny z tyčí. Pokud je požadován neobvyklý tvar, je nutné vyrobit velké množství tohoto produktu, aby se zaplatily náklady na výrobu šablony. Maximální rozměr průřezu se liší podle výrobce, ale musí být menší než kruh o průměru 300 mm. Jednotlivé protlačované výrobky jsou dostupné v délkách do 10 m. Kromě standardních tvarů lze protlačováním zhotovit širokou škálu jiných specifických tvarů, které by jinak vyžadovaly obrábění nebo by musely být svařovány. Kvůli zjištění minimální tloušťky průřezů a poloměru rohů je nutné kontaktovat dodavatele.

2.7.5 Svařované průřezy

Svařované průřezy jsou nejčastěji využívány v případech potřeby specifických tvarů v malém množství, průřezů s ostrými rohy, pásnic bez náběhů nebo průřezů velkých rozměrů. Pokud projekt vyžaduje malý počet prvků neobvyklých tvarů nebo průřezy velkých rozměrů, zkušení výrobci jsou obvykle schopni vyrobit požadovaný tvar a velikost svařením desek z korozivzdorných ocelí dle standardních schválených metod.

Úhelníky, nosníky, U průřezy, T průřezy a uzavřené průřezy, svařované laserem nebo obloukem, jsou v běžných dimenzích velmi dobře a rychle dostupné. Úhelníky, nosníky a U průřezy do 400 mm výšky či šířky průřezu jsou běžně dostupné v austenitických třídách korozivzdorných ocelí. Lze ale vyrobit i průřezy větších rozměrů, a to i z austeniticko-feritických ocelí.

2.7.6 Povrchová úprava

V některých případech je povrchová úprava a konzistence vzhledu důležitá kvůli požadavkům na čistotu povrchu, vzhled a zabránění vzniku koroze. Části 4 a 5 normy EN 10088 specifikují řadu standardních povrchových úprav, od matných až po lesklé povrchy. Každá povrchová úprava je značena číslem (1 pro povrchy materiálů válcovaných za tepla a 2 pro válcované za studena) a následně písmenem. Masivní otevřené průřezy jsou obvykle opatřeny povrchem 1D (válcované za tepla, tepelně zpracované a mořené). Při architektonickém využití se většinou používají za studena válcované prvky, jelikož mají hladší povrch než ty válcované za tepla, například s povrchovou úpravou 2B (za studena válcované, tepelně zpracované, mořené a s kontrolovaným povrchem), která je standardní a cenově přijatelná. K dispozici jsou také další speciální povrchové úpravy s ohledem na konzistenci vzhledu. Je třeba zmínit, že různorodost zpracování způsobuje rozdíly ve vzhledu materiálu mezi jednotlivými výrobci, ale dokonce i u jednoho výrobce, tudíž dodavatel musí být informován o požadavcích na výsledný vzhled povrchu. Doporučuje se, aby se investor a dodavatel dohodli na referenčním vzorku. Lesklé povrchy způsobují zjevnější viditelnost každé nerovnosti. Matný povrch vypadá vždy hladší. Samozřejmě je také malý rozdíl mezi odstíny přirozené stříbrné barvy jednotlivých skupin korozivzdorných ocelí (austenitické, austeniticko-feritické a feritické), který je nutné vzít v úvahu během návrhu.

Poznámka: Moření je proces, při kterém dojde k odstranění tenké vrstvy kovu, obvykle pomocí směsi kyseliny dusičné a fluorovodíkové, z povrchu korozivzdorné oceli. Alternativní, méně agresivní, sloučeniny jsou dostupné u specializovaných výrobců.

2.7.7 Šrouby

Nejdostupnější jsou šrouby z austenitické oceli třídy pevnosti 70 dle normy EN ISO 3506. V této normě jsou také uvedena příslušná omezení velikosti a délky šroubů. Je možné učinit objednávku na nestandardní speciální šrouby, v některých případech to může být i ekonomicky příznivé řešení.

Šrouby mohou být vyráběny řadou technologií, například obráběním, válcováním za studena nebo kování. Šrouby s válcovanými závity mají kvůli zpevnění, které nastává během válcování, vyšší pevnost než ty s obráběnými závity. Tlakové napětí na povrchu válcovaných závitů zvyšuje odolnost vůči únavové korozi a v některých případech také vůči koroznímu praskání. Válcované závity mají také větší odolnost vůči poškození závitu. Válcování je nejběžnější způsob výroby šroubů a vrutů, zejména u masové výroby běžných velikostí. U šroubů větších průměrů (zhruba nad M36) a zejména u pevnějších austeniticko-feritických šroubů je pravděpodobné, že závity budou řezané.

2.8 Náklady životního cyklu a dopad na životní prostředí

V současné době stále roste povědomí o tom, že náklady na životní cyklus (nebo celkovou životnost), a nikoli pouze počáteční náklady, by měly být vzaty v úvahu při výběru materiálu. Zkušenosti ukazují, že použití materiálu odolného vůči korozi za účelem snížení potřeby údržby konstrukce, prostojům a výměnám částí konstrukce, může být finančně efektivnějším řešením, přestože jsou počáteční náklady vyšší. Do nákladů na životní cyklus se započítává:

- Počáteční náklady;
- Náklady na údržbu;

- Zamezení odpadu a recyklovaný obsah;
- Provozní životnost a prostředí.

Počáteční cena surového materiálu je u korozivzdorné oceli podstatně vyšší, v závislosti na třídě korozivzdorné oceli, než cena ekvivalentní uhlíkové oceli. Tento rozdíl se však výrazně sníží kvůli nákladům na opatření uhlíkové oceli protikorozními povlaky. Využití korozivzdorných ocelí s vysokou pevností může snížit celkové množství potřebného materiálu, v důsledku zmenšení potřebné velikosti průřezů a celkové hmotnosti konstrukce, což sníží počáteční náklady. Navíc není potřeba udržovat protikorozní povlaky nebo vyměňovat dílčí zkorodované prvky konstrukce, díky čemuž dojde k významným dlouhodobým úsporám nákladů na údržbu.

Díky vynikající odolnosti korozivzdorných ocelí vůči korozi není nutná tak častá kontrola konstrukce v porovnání s uhlíkovou ocelí, čímž dochází ke snížení nákladů na údržbu a k prodloužení životnosti konstrukce.

Korozivzdorné oceli mají vysokou zbytkovou hodnotu odpadu (tj. hodnotu na konci životnosti konstrukce), i když je to zřídka kdy rozhodujícím faktorem konstrukce s plánovanou dlouhodobou životností (například nad 50 let). S ohledem na vysokou hodnotu zbytkového odpadu se použitý materiál a šrot neodváží na skládku, ale vzhledem k vysoké míře možnosti recyklace se recykluje do nových kovů. Výrobci korozivzdorných ocelí používají tolik šrotu, kolik je možné, ale jelikož průměrná celková životnost materiálu činí 20 až 30 let, dostupnost šrotu je tak značně omezena. Korozivzdorné oceli jsou obvykle tvořeny minimálně z 60 % recyklovaným materiálem. Korozivzdorná ocel je 100% recyklovatelný materiál a může být bez jakýchkoli omezení recyklována do nové vysoce kvalitní korozivzdorné oceli.

Náklady na životní cyklus jsou počítány standardním účetním principem diskontovaných peněžních toků, aby se výše těchto nákladů upravila na stávající hodnotu. Diskontní sazba zahrnuje inflaci, bankovní úrokové sazby, daně a případně rizikový faktor. Díky tomu je umožněno reálné porovnání dostupných možností a dlouhodobých výhod při použití korozivzdorných ocelí a jiných materiálů.

3 TRVANLIVOST A VÝBĚR MATERIÁLU

3.1 Úvod

Korozivzdorné oceli jsou obecně velmi odolné vůči korozi a jsou dostatečně vhodné pro většinu prostředí. Omezení korozní odolnosti konkrétní korozivzdorné oceli je závislé zejména na zastoupení jednotlivých prvků v jejím složení, což znamená, že každá třída oceli má mírně odlišnou reakci při vystavení koroznímu prostředí. Je tedy potřebné věnovat pozornost výběru vhodné třídy oceli pro dané použití. Obecně, čím větší je potřebná korozní odolnost, tím vyšší je také cena materiálu. Například, ocel 1.4401 je dražší než ocel 1.4301 kvůli přidání molybdenu. Austeniticko-feritické oceli potenciálně nabízejí vyšší korozní odolnost při nižším nárůstu ceny. Navíc jejich vyšší pevnost může vést k redukci velikosti prvků a tedy i výsledné ceny za materiál.

Austenitický materiál zpracovaný za studena má podobnou korozní odolnost jako ve vyžáhaném, resp. původním stavu.

Nejčastějším důvodem selhání korozní odolnosti oceli během navržené životnosti je zpravidla:

- (a) nesprávné zhodnocení prostředí, kterému je ocel vystavena, jako je např. přítomnost chloridových iontů nebo vyšší než předpokládané znečištění povrchu;
- (b) nevhodný výrobní postup při výrobě či zpracování (chyby např. při svařování, tepelném zpracování a zahřívání během tváření), neúplné odstranění povrchového zbarvení kovu po svařování nebo kontaminace povrchu, která může zvýšit náchylnost ke korozi;
- (c) příliš hrubá nebo nevhodně orientovaná (směr linií) povrchová úprava.

I když dojde ke skvrnám na povrchu nebo výskytu rzi, není tím nezbytně ovlivněna i únosnost. Uživatel může nicméně považovat nevzhledné výskyty skvrn rzi na vnějším povrchu za poruchu. Stejně jako pečlivý výběr správné třídy oceli, volba správných detailů a dobré zpracování může významně snížit možný výskyt skvrn a rzi; praktický návod je uveden v kapitole 11. Ze zkušenosti lze očekávat, že případná vada se projeví během dvou až tří let používání.

V určitých agresivních prostředích jsou některé třídy oceli náchylné k lokalizovaným napadením korozi. V následující části je popsáno šest možných mechanismů, byť poslední tři jsou u pozemních staveb poměrně vzácné.

Je třeba zdůraznit, že pro možný výskyt koroze je nezbytná přítomnost vlhkosti (včetně vlhkosti způsobené kondenzací).

3.2 Typy koroze a chování jednotlivých tříd korozivzdorné oceli

3.2.1 Bodová koroze

Jak napovídá název, bodová koroze je místní typ koroze. Dochází k ní pronikáním slabými místy do pasivní vrstvy zpravidla chloridovými ionty, přestože jiné halogenidy a jiné anionty mohou mít podobný účinek. U rozvíjející se bodové koroze může korozní produkt vytvořit vysoce korozní roztok, často vedoucí k urychlení rychlosti šíření. Ve většině konstrukčních aplikací bude povrchová bodová koroze pravděpodobně nízká a přijatelná, protože zmenšení průřezu konstrukčního prvku bude zanedbatelné. Korozní produkty však mohou poškodit architektonický vzhled

prvku. Horší vzhled v důsledku bodové koroze se má připustit pro konstrukce jako jsou kanály, potrubí a ochranné obálky.

Jelikož je výskyt chloridových iontů zdaleka nejběžnější příčinou bodové koroze, přímořské oblasti a prostředí zatížená rozmrazovací soli jsou dosti agresivní. Spolu s obsahem chloridů je možnost provozního prostředí způsobujícího bodovou korozi závislá na faktorech jako je teplota, korozivní znečišťující látky a částice, kyselost nebo zásaditost, obsah oxidačních činidel a také přítomnost nebo nepřítomnost kyslíku. Odolnost vůči bodové korozi je u korozivzdorných ocelí závislá na jejich chemickém složení. Chrom, molybden a dusík tuto odolnost zvyšují.

Ekvivalent odolnosti vůči bodové korozi (PRE - Pitting Resistance Equivalent) udává přibližný empiricky odvozený odhad odolnosti definovaný jako:

$$\text{PRE} = \% \text{ hm Cr} + 3,3(\% \text{ hm Mo}) + 16(\% \text{ hm N})$$

Ekvivalent PRE určité korozivzdorné oceli je užitečné vodítko pro porovnání její korozní odolnosti s jinou korozivzdornou ocelí, ale měl by být použit pouze jako hrubý indikátor. Malé rozdíly v ekvivalentu PRE mohou být snadno zastíněny jinými faktory, které rovněž ovlivňují odolnost vůči bodové korozi. Proto by PRE nemělo být jediným faktorem při výběru.

Třída 1.4301 má nejnižší ekvivalent PRE z austenitických ocelí uvedených v této příručce. Vykazuje povrchovou korozi při vystavení nízké až střední expozici přímořského prostředí nebo rozmrazovacích solí a je nevhodná do prostředí s rozprašováním / mlhou, oplachy nebo ponorem. Třída 1.4301 může rovněž vykazovat nepřijatelný stupeň bodové koroze v průmyslovém prostředí.

Pro střední průmyslové znečištění, vystavení přímořskému prostředí nebo rozmrazovacím solím jsou preferovány oceli 1.4401 nebo austeniticko-feritické třídy 1.4362 či 1.4162. Pokud je stupeň znečištění nebo výskytu solí vysoký, je běžným řešením použití austeniticko-feritické oceli 1.4462 nebo korozivzdorné oceli s ještě větší odolností.

3.2.2 Štěrbínová koroze

Štěrbínová koroze vzniká v těsných, odkrytých štěrbinách, kde se vyskytuje souvislý vodní film jak uvnitř tak vně štěrbin. Štěrbina musí být natolik drobná, aby umožňovala přístup vody a rozpuštěných chloridů a zároveň zabraňovala pronikání kyslíku do štěrbin.

Štěrbínové korozi lze zabránit utěsněním nebo vyloučením štěrbin. Závažnost štěrbin je vysoce závislá na její geometrii. Čím užší a hlubší štěrbina je, tím vážnější korozní riziko představuje.

Přípoje, které nejsou potopené, by měly být navrženy s odvodem vlhkosti. Některé korozivzdorné oceli, včetně tříd 1.4301 a 1.4401, jsou náchylné ke štěrbinové korozi, pokud jsou v prostředí přítomny chloridy nebo soli. Austenitické oceli s vyšší korozní odolností a austeniticko-feritické oceli jsou méně náchylné ke štěrbinové korozi, jejich chování bude závislé na dalších podmínkách, zejména teplotě.

Závažnost koroze ponořených štěrbin je obecně vyšší než koroze štěrbin v atmosféře při opakujícím se máčení a sušení nebo pravidelně mírně navlhých. Ponořené těsné štěrbin jsou horší kvůli většímu zamezení přísunu oxidantů potřebných pro obnovení pasivní vrstvy.

Štěrbiny mohou vzniknout ve spojení kovu s kovem, těsněním, biologickým znečištěním (např. částice, listy, strava, úlomky) a poškozením povrchu jako je zaryté železo. Je potřeba se zaměřit na zamezení štěrbin, ale často není možné štěrbinám zamezit kompletně.

Stejně jako u bodové koroze je vlivem legujících prvků chromu, molybdenu a dusíku zvýšena odolnost vůči korozi a tedy i odolnost vůči štěrbinové korozi se zvyšuje od třídy 1.4301 přes 1.4401 k 1.4462.

3.2.3 Bimetalická (galvanická) koroze

V případě elektrického kontaktu dvou nestejných kovů v jakémkoli elektrolytu (např. tekutina vedoucí elektrický proud, jako je mořská voda nebo nečistá sladká voda) dochází k proudění z anodického materiálu do katodického ušlechtilejšího materiálu prostřednictvím elektrolytu. Výsledkem toho méně ušlechtilý kov koroduje.

Korozivzdorná ocel je obvykle katodou v galvanickém článku, a proto u ní nedochází ke korozi. Korozivzdorná ocel a slitiny mědi mají velmi blízké hodnoty elektrického potenciálu a proto, pokud jsou vystaveny středním atmosférickým podmínkám, mohou být obecně bez obav umístěny v přímém kontaktu.

Tento typ koroze je závažný zejména při uvažování spojů korozivzdorné a uhlíkové oceli nebo nízkolegovaných ocelí, patinujících ocelí a hliníku. Je důležité zajistit, aby svarový kov byl alespoň tak ušlechtilý jako nejvíce korozně odolný materiál ve spoji (běžně korozivzdorná ocel). Obdobně pro spojovací prostředky, materiál spojovacího prostředku by měl být rovnocenný materiálu s největší korozní odolností. Galvanická koroze mezi různými typy korozivzdorné oceli není běžně problém, s výjimkou plného ponoření.

Bimetalové korozi může být zabráněno zamezením proudění pomocí:

- Izolováním nestejných kovů, např. přerušením kontaktu kovů (viz část 7.1.1);
- Zabránění spojení elektrolytem, např. zabránění cesty elektrolytu nátěrem nebo jiným povlakem. Pokud je taková ochrana žádaná a je nepraktické natřít oba kovy, je preferováno natřít pouze ušlechtilejší z obou kovů (např. korozivzdornou ocel ve spoji korozivzdorná/běžná uhlíková ocel).

Riziko hluboké koroze je nejvyšší ve styčné ploše, kde je ušlechtilejší kov (např. korozivzdorná ocel) výrazně větší v porovnání s plochou méně ušlechtilého kovu (např. uhlíková ocel). Zvláštní péče musí být věnována použití nátěrů nebo jiných povlaků provedených na uhlíkové oceli. Pokud se v povlaku vyskytují póry nebo dírký, tato malá plocha uhlíkové oceli pak poskytuje velký poměr plochy katody k anodě a může dojít k výrazné místní korozi uhlíkové oceli. Toto riziko bude pochopitelně nejvyšší při ponoření. V takové situaci se preferuje provést nátěr korozivzdorné oceli do vzdálenosti minimálně 75 mm za místo, kde jsou oba kovy v kontaktu, takže pak případné póry způsobují pouze kontakty malých ploch.

Nepříznivé poměry ploch se mohou vyskytovat u šroubů a v přípojích. Šroubů z uhlíkových ocelí by se u prvků z korozivzdorné oceli nemělo vůbec používat s ohledem na vysoký poměr ploch částí z korozivzdorné oceli k částem z oceli uhlíkové, kdy by šrouby byly vystaveny silné korozi. Opačně, koroze prvků z uhlíkové oceli nebo hliníku při použití šroubů z korozivzdorné oceli je zanedbatelná. Je zpravidla užitečné vyjít z předchozích zkušeností v oblastech podobných návrhových, neboť nestejně kovy mohou být použity bezpečně v kontaktu při občasné kondenzaci nebo vlhkosti, zvláště pokud je vodivost elektrolytu nízká.

Předvídání těchto vlivů je složité, protože rychlost koroze je dána řadou komplikovaných proměnných. Použití tabulek elektrických potenciálů ignoruje přítomnost povrchových oxidových filmů, účinek poměru ploch kovů v kontaktu a různé chemické složení roztoků (elektrolytu). Proto neinformovanost při použití takových tabulek může vést k chybným výsledkům. Jejich použití by mělo být opatrné a sloužit pouze k počátečnímu zhodnocení.

Obecné chování kovů v bimetalickém kontaktu ve venkovském, městském, průmyslovém a přímořském prostředí je uceleně zdokumentováno v BS PD 6484 *Commentary on corrosion at bimetallic contacts and its alleviation*.

3.2.4 Korozní praskavost

Výskyt korozní praskavosti (stress corrosion cracking - SCC) vyžaduje současnou přítomnost tahových napětí a zvláštních faktorů vnějšího prostředí, které se v běžných atmosférách pro stavby obvykle nevyskytují. Přitom není nutné, aby napětí bylo příliš vysoké v poměru ke smluvní pevnosti materiálu. Může se jednat o napětí vyvolané zatížením nebo o zbytková napětí z procesu zpracování, jako je svařování nebo tvarování. Feritické oceli nejsou náchylné ke korozní praskavosti. Austeniticko-feritické oceli mají zpravidla vyšší odolnost proti korozní praskavosti než austenitické oceli zahrnuté v této příručce. Více legované austenitické třídy jako 1.4539, 1.4529, 1.4547 a 1.4565 byly vyvinuty pro použití v případech, kdy je korozní rizikem korozní praskavost.

S opatrností se má postupovat v případech, kdy prvky z korozivzdorných ocelí obsahují vysoké zbytkové napětí (například po zpracování za studena) a jsou používány v prostředí bohatém na chloridy (jako jsou např. bazénové haly, mořské a přímořské prostředí). Vysoce namáhaná lana v prostředí s vysokým obsahem chloridů mohou být náchylná ke korozní praskavosti v závislosti na třídě oceli.

Část 3.5.3 uvádí postup výběru třídy oceli pro bazénové haly, tak aby ke korozní praskavosti nedocházelo.

3.2.5 Celková (plošná) koroze

V prostředí obvyklém pro umístění konstrukcí korozivzdorné oceli nevykazují celkovou ztrátu průřezu tak jak je to charakteristické pro korozi nelegovaných slitin a ocelí.

3.2.6 Mezikrystalová koroze a rozpad svaru

Když jsou austenitické korozivzdorné oceli vystaveny dlouhodobému ohřevu v rozmezí teplot 450 °C až 850 °C, uhlík v oceli difunduje na hranice zrn a precipituje jako karbid chromu. Tím se odebírá chrom z mikrostruktury a na hranicích zrn se snižuje jeho obsah. Ocel se v takovém stavu označuje jako „citlivá“. Hranice zrn potom jsou náchylnější k napadení při následném vystavení oceli koroznímu prostředí. Tento jev je známý jako „rozpad svaru“, když se vyskytuje v tepelně ovlivněné oblasti svaru.

Existují tři způsoby jak se vyhnout mezikrystalové korozi:

- Použití oceli s nízkým obsahem uhlíku;
- Použití oceli stabilizované titanem nebo niobem (např. 1.4541, 1.4571, 1.4509, 1.4521 nebo 1.4621), protože tyto prvky se přednostně váží na uhlík ve formě stabilních složek, takže snižují riziko vzniku karbidu chromu;
- Použití tepelného zpracování, i když se tato metoda v praxi používá jen zřídka.

Vztaženo k austenitickým a austeniticko-feritickým ocelím by pro svařování průřezů měly být s ohledem na zabránění náchylnosti k mezikrystalové korozi vybrány třídy s nízkým obsahem uhlíku (max. 0,03 %). Mezikrystalová koroze je u austenitických a austeniticko-feritických ocelí velmi vzácná, neboť moderní výrobní postupy zaručují nízký obsah uhlíku a zabraňují tak problému.

Feritické oceli jsou oproti austenitickým ocelím více náchylné ke vzniku „citlivého“ stavu vlivem svařování. Proto je i při nízkém obsahu uhlíku důležité pro svařované průřezy volit stabilizované feritické třídy.

3.3 Koroze ve vybraných prostředích

3.3.1 Vzduch

Atmosférická prostředí se liší a stejně tak jejich vliv na korozivzdornou ocel. Venkovské prostředí bez průmyslového znečištění a bez přímořských solí je v ohledu na korozi velmi mírné, dokonce i v oblastech s vysokou vzdušnou vlhkostí. Posypová rozmrazovací sůl nebo přímořské prostředí je výrazně více korozně závažné. Pro výběr vhodného typu korozivzdorné oceli se odkazuje na použití části 3.5.

Nejčastějším důvodem atmosférické koroze jsou povrchy kontaminované částicemi železa pocházejících z procesu výroby a výstavby buď v dílně či na stavbě, a chloridy pocházející z moře, posypových solí, průmyslového znečištění a chemikálií (např. bělicího činidla a kyseliny chlorovodíkové). Některé uložené částice (prach, písek, vegetace nebo suť) mohou i přesto že jsou inertní vytvořit štěrbinu a jsou schopné absorbovat soli, chemikálie a slabě kyselé roztoky z kyselých dešťů. Jelikož jsou také schopny zachovat vlhkost po delší dobu, můžou lokálně vést k vyššímu koroznímu prostředí.

Povrchová úprava má rovněž významný vliv na celkový vzhled nechráněné korozivzdorné oceli (např. usazování nečistot), účinnost oplachu deštěm a rychlost koroze (hladší povrchové úpravy mají lepší korozivní odolnost).

3.3.2 Mořská voda

Mořská voda, včetně vody brakické, obsahuje vysoké koncentrace chloridů, a proto je vysoce korozní. Může vést k závažné bodové korozi tříd 1.4301 a 1.4401. U těchto tříd může rovněž docházet ke korozi ve štěrbinách navržených detailů nebo způsobených přísátými mořskými živočichy jako jsou třeba přisedlí korýši.

V některých případech, kdy je možné tolerovat případnou korozi, životnost konstrukce je omezena a jednotlivé části konstrukce jsou pravidelně kontrolovány, lze použít austeniticko-feritickou třídu oceli 1.4462. Pro konstrukce s delší životností by měly být navrhovány tzv. super austenitické, super feritické a super austeniticko-feritické třídy ocelí. (Tyto oceli mají větší obsah prvků jako chrom, nikl, molybden, měď a dusík. Vykazují takový stupeň korozní odolnosti, který umožňuje jejich použití pod mořskou hladinou a v provozech s vysokou koncentrací kyselin. Typické super austenitické třídy jsou 1.4565, 1.4529 a 1.4547 a typické super austeniticko-feritické třídy jsou 1.4410, 1.4501 a 1.4507.)

Pravidelné slané sprchy či postřik může mít stejně nepříznivý účinek jako úplné ponoření, jelikož koncentrace chloridů na povrchu je zvýšena odpařováním vody. Je třeba poznamenat, že vysoká koncentrace chloridů dešťové vody s posypovou solí může vést u částí odvodnění k podobným problémům.

Pokud je korozivzdorná ocel spolu s jinými kovy přítomna v mořské vodě, je rovněž nutné brát v potaz možnost výrazné bimetalové koroze.

3.3.3 Ostatní voda

Běžné austenitické a austeniticko-feritické korozivzdorné oceli ve styku s destilovanou vodou, kohoutkovou vodou i vodou otopných soustav dobře obstojí. Pokud je pH vody nižší než 4, měla by volba pro konkrétní případ vycházet z doporučení specializovaného inženýra.

Neupravená říční voda či voda z výrobních procesů může být někdy velmi korozivní. Měl by být proveden kompletní chemický rozbor vody zahrnující i stupeň pH, obsah pevných částic a jejich druhu spolu s obsahem chloridů. Stejně tak je podstatný rozsah teploty, druh biologického a mikrobiologického působení spolu s koncentrací a druhem korozivních chemikálií. Pokud voda nespĺňuje nároky na pitnou vodu, měl by výběr třídy korozivzdorné oceli vycházet z doporučení specializovaného inženýra.

Je třeba rovněž zohlednit případnou erozní korozi způsobenou vodou nesoucí abrazivní částice.

3.3.4 Chemické prostředí

Jelikož korozivzdorná ocel dobře odolává mnoha chemikáliím, je často používána pro ochranné obálky. Využití korozivzdorných ocelí v chemickém prostředí je vysoké a není možné zde detailně toto téma popsat. Chemické prostředí je mimo rozsah doporučení pro výběr materiálu uvedených normou EN 1993-1-4. Je třeba poznamenat, že pro řadu použití by bylo použito jiných tříd korozivzdorných ocelí, než jaké jsou uvedeny v této příručce. Výběr třídy korozivzdorné oceli by měl vycházet z doporučení specializovaného inženýra.

Tabulky publikované výrobcí ukazující výsledky korozních zkoušek v různých chemikáliích vyžadují opatrnou interpretaci. Přestože jsou vodítkem pro korozní odolnost jednotlivých tříd, podmínky provozu (teplota, tlak, koncentrace atd.) jsou různé a budou se obecně lišit od podmínek během zkoušek. Stejně tak lze očekávat znatelný vliv nečistot a stupně přístupu vzduchu na celkový výsledek.

3.3.5 Půda

Půdy se liší svou korozivností v závislosti na jejich vlhkosti, stupni pH, provzdušnění, přítomnosti chemického znečištění, mikrobiologickém působení a odvodnění povrchu. Korozivzdorné oceli při styku s půdou zpravidla velmi dobře obstojí, obzvláště pokud se jedná o půdy s vysokou rezistivitou, i když u vlhkých půd s nízkou rezistivitou může dojít k bodové korozi. Přítomnost agresivních chemických druhů jako chloridové ionty stejně jako typů bakterií a bludných proudů (z místních vedení elektrického proudu pro železnice či tramvaje) může vést k místní korozi. Výskyt bludných proudů může být potlačen správnou elektrickou izolací trubek vedení (potažením či obalením) a / nebo katodovou ochranou.

Pro účely výběru třídy oceli se doporučuje zohlednit korozní odolnost v půdě zapuštěných částí nejprve ve vztahu k výskytu chloridových iontů a následně s ohledem na rezistivitu půdy a pH s uvažováním všech půd jako nedokonale odvodněných. Tabulka 3.1 doporučuje vhodné třídy oceli pro různé podmínky půdy.

Tabulka 3.1 Třídy korozivzdorných ocelí při použití v různých podmínkách půd

Typické území	Podmínky půdy	Třída korozivzdorné oceli
Vnitrozemí	Cl < 500 ppm	1.4301, 1.4307 1.4401, 1.4404
	Rezistivita >1000 Ω·cm	
	pH > 4,5	
Chloridová (přímořská / posypové soli) bezpřílivová oblast	Cl < 1500 ppm	1.4401, 1.4404
	Rezistivita >1000 Ω·cm	
	pH > 4,5	
Chloridová (přímořská / posypové soli) přílivová oblast	Cl < 6000 ppm	1.4410, 1.4547, 1.4529
	Rezistivita >500 Ω·cm	
	pH > 4,5	
Poznámka: 1.4410 je super austeniticko-feritická třída a 1.4547 a 1.4529 jsou super austenitické třídy. Tyto třídy nejsou v konstrukcích běžně používány a jsou mimo rozsah této příručky.		

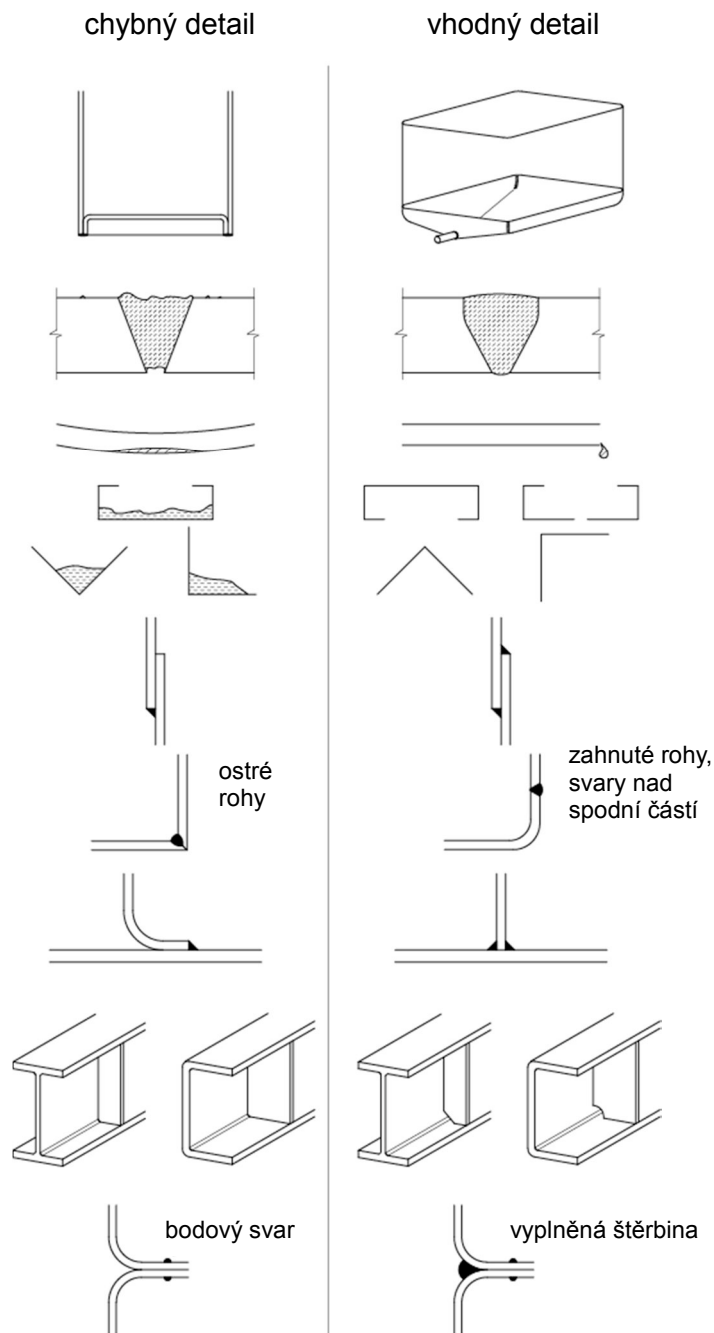
3.4 Navrhování na omezení koroze

Nejdůležitějším krokem v prevenci problémů koroze je výběr korozivzdorné oceli s vhodnou odolností a volba vhodných výrobních postupů pro dané prostředí. Nicméně po specifikaci konkrétní oceli může být plného využití její korozní odolnosti dosaženo pečlivou volbou detailů. Protikorozní opatření by v ideálním případě měla být brána v úvahu již ve fázi plánování a při navrhování detailů.

Tabulka 3.2 uvádí seznam pokynů, ke kterým by mělo být přihlédnuto. Ne všechny body vedou k nejvýhodnějšímu detailu, s ohledem na únosnost spoje a stejně tak nejsou míněny pro použití ve všech prostředích. Mnoho z nich nebude požadováno zejména v prostředích s nízkou korozivitou nebo tam, kde dochází k pravidelné údržbě. Obrázek 3.1 ukazuje příklady nevhodných a vhodných řešení s ohledem na trvanlivost.

Tabulka 3.2 Navrhování na omezení koroze

<p>Omezit nánosy nečistot, vlhkosti a ukládání korozních produktů</p> <ul style="list-style-type: none"> • úhelníky a korytkové profily orientovat tak, aby se minimalizovala pravděpodobnost ukládání nečistoty a zadržování vlhkosti; • vytvořit dostatečně velké odvodňovací otvory, aby se zabránilo jejich ucpání; • vyloučit vodorovné plochy; • provést malý sklon výztuh, které formálně leží ve vodorovné rovině; • použít trubky a tyčové průřezy (uzavřené trubky naplněné suchým plynem nebo vzduchem, v případě nebezpečí vzniku škodlivých kondenzací); • předepsat hladké úpravy povrchu, nebo pokud je hrubší úprava nevyhnutelná, orientovat směr kresby svisle.
<p>Vyloučit nebo utěsnit štěrbiny</p> <ul style="list-style-type: none"> • přednostně použít svařované spoje před šroubovanými; • použít těsnící svary nebo tmelové výplně; • dát přednost vzhledovým nebo povlakovým svarům pro vyhlazení povrchu; • zajistit prevenci proti biologickému poškození; • používat pružné inertní podložky nebo vysoce kvalitní těsnění pro nadzemní, neponořené šroubované spoje.
<p>Omezit pravděpodobnost korozní praskavosti v prostředích, kde se může projevit (viz část 3.2.4):</p> <ul style="list-style-type: none"> • minimalizovat vnitřní pnutí ve výrobě pečlivým výběrem svařovacího postupu; • tryskat povrch (vyloučit použití železných nebo ocelových drtí, aby nemohlo dojít k uvíznutí částí uhlíkové oceli v povrchu).
<p>Omezit pravděpodobnost bodové koroze (viz kapitola 11):</p> <ul style="list-style-type: none"> • odstranit rozstřík svarového kovu; • mořit korozivzdornou ocel pro odstranění zbarvení po svařování. Mají se vyloučit silně oxidační chloridové prostředky, jako je chlorid železitý, místo toho se má použít mořící lázeň nebo mořící pasta, které obsahují směs kyseliny dusičné a kyseliny fluorovodíkové. Svary se mají vždy čistit, aby byla obnovena jejich korozní odolnost. Lze použít i jiné prostředky pro čištění svarů a jejich zbarvení po svařování jako je mechanické čištění brusivy nebo tryskání skleněnými perlami či místní elektrolýza; • vyloučit zachycení částecek uhlíkové oceli (například použitím výrobních ploch a nástrojů určených pro korozivzdorné oceli); • dodržet vhodný program údržby.
<p>Omezit pravděpodobnost bimetalické koroze (viz část 3.2.3):</p> <ul style="list-style-type: none"> • provést elektrickou izolaci mezi šroubovanými kovy pomocí inertního materiálu jako je neopren; • přiměřeně použít nátěr; • minimalizovat období vlhkosti; • používat kovy, které jsou si blízké svým elektrickým potenciálem.



Obrázek 3.1 Chybné a vhodné a konstrukční detaily s ohledem na trvanlivost

3.5 Výběr materiálu

3.5.1 Úvod

Ve většině realizací konstrukcí z korozivzdorných ocelí je důvodem jejich návrhu korozní odolnost, ať už s ohledem na pohledové vlastnosti, minimální nároky na údržbu nebo dlouhodobou trvanlivost. Korozní odolnost proto musí být prvotním kritériem pro výběr vhodné třídy oceli.

Při výběru nejvhodnější třídy korozivzdorné oceli se má uvážit prostředí pro dané použití, výrobní postup, vhodnost materiálu k opracování, úpravy povrchu a údržba konstrukce. Navíc musí projektant stanovit kritéria pro selhání v důsledku koroze. Pokud musí prvek zůstat konstrukčně spolehlivý po definovanou dobu a jeho vzhled není podstatný, je při výběru zohledněna přijatelná míra koroze a může tak být přijatelný i materiál s menší mírou korozní odolnosti. Pokud je ale požadován bezvadný vzhled bez výskytu koroze, pak je třeba volit materiál s vyšší korozní odolností a hladším povrchem, nebo lze požadovat častější čištění. I když korozivzdorné oceli mají nízké požadavky na údržbu, i jejich pouhý oplach, dokonce i pouze deštěm, může zajistit nebo zlepšit jejich vzhled a pomoci prodloužit jejich životnost.

Prvním krokem je charakterizovat prostředí v místě konstrukce a zahrnout i předpokládané výkyvy od návrhových podmínek. Navíc je třeba zohlednit jak vystavení korozním látkám, provozním podmínkám, klimatu a konstrukční detaily, které mohou rovněž ovlivnit chování, tak předpokládanou dobu životnosti. Například použití v průmyslu ovlivňujícím kombinace korozních chemikálií, jejich koncentrace, doba působení, nánosy na povrchu, kyselost a údržba čištěním. Při použití v exteriéru musí být zohledněno vystavení silným oplachům deštěm (nebo jejich byť částečné stínění), stupeň vlhkosti (např. vzdušná vlhkost, síla dešťů, mlhy), množství vzdušných částic, slané spršky (např. na skalním mořském pobřeží, v blízkosti silnic), stříkání nebo ponoření ve slané vodě (chloridy) apod. Při veškerém použití je chování ovlivněno konstrukčními detaily, jako jsou neutěsněné štěrby, kontakty různých kovů a úpravou povrchů. Stejně je třeba zohlednit další vývoj nebo změnu používání. I při umístění v těsné blízkosti mohou být konstrukce vystaveny velmi odlišným korozním prostředím.

Může být stanoveno i několik alternativních tříd oceli korozní odolnosti vyhovujících pro navrhované prostředí. Výběr by měl být založen na zvážení možných forem koroze. Dále je pak třeba zvážit požadované mechanické vlastnosti, možnosti výroby, dostupnost požadované formy výrobku, možnost povrchové úpravy a cenu.

3.5.2 Postup pro výběr austenitických a austeniticko-feritických tříd korozivzdorných ocelí dle EN 1993-1-4

Příloha A normy EN 1993-1-4 udává postup pro výběr korozivzdorné oceli pro použití v konstrukcích. Uvedený postup se týká výběru materiálu pro konstrukční použití s tím, že pro spojovací prostředky do betonu, resp. zdiva se má odkazovat na EN 1992 a EN 1996. Postup nezohledňuje:

- Dostupnost výrobku/třídy oceli;
- Požadavky na povrchovou úpravu, např. s ohledem na architektonické či hygienické důvody;
- 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 je vhodný pro prostředí na území Evropy. Postup nemá být použit pro regiony mimo Evropu a může být obzvláště zavádějící pro určité části světa jako je Blízký východ, Dálný východ a Střední Amerika.

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).

Tabulka 3.5 udává třídy materiálu s vhodnou korozní odolností pro dané provozní prostředí. Výběr konkrétní třídy materiálu je závislý kromě korozní odolnosti i na dalších faktorech, jako je např. pevnost materiálu a dostupnost výrobků požadovaného tvaru. Specifikace materiálu pomocí CRC a návrhové pevnosti, např. CRC II a $f_y = 450 \text{ N/mm}^2$, je dostatečná pro doporučení konkrétní třídy materiálu předepsané třídy CRC dodavatelem.

Postup se vztahuje na dílce vystavené vnějšímu prostředí. Pro dílce ve vnitřně kontrolovaném prostředí je CRF rovno 1,0. Vnitřně kontrolované prostředí je prostředí, které je buď klimatizováno, vytápěno, nebo uzavřeno dveřmi. Parkovací domy, nákladíště nebo jiné konstrukce s velkými otvory mají být uvažovány jako venkovní prostředí. Bazénové haly jsou zvláštním případem vnitřního prostředí (část 3.5.3).

Součinitel CRF závisí na nepříznivosti prostředí a je vypočten jako:

$$\text{CRF} = F_1 + F_2 + F_3$$

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.

Hodnota F_1 pro použití na pobřeží závisí na konkrétním umístění v Evropě a je odvozena ze zkušeností s existujícími konstrukcemi, korozních zkoušek a dat o výskytu chloridů. Kvůli široké škále možných prostředí v Evropě bude v některých případech vypočítaný CRF konzervativní.

Národní příloha může stanovit, zda je přípustné použít příznivější hodnoty CRF na základě ověřených místních provozních zkušeností nebo dat ze zkoušek, které tuto volbu odůvodní. V ČR se doporučuje použít hodnoty CRF beze změn.

Různé části jedné konstrukce mohou být vystaveny různým podmínkám, např. jedna část může být plně vystavena a další zcela chráněna. Každý případ expozice má být posouzen zvlášť.

Postup předpokládá splnění požadavků normy EN 1090-2 s ohledem na technologické postupy svařování a čištění svarů a na zabránění znečištění nebo odstranění a očištění znečištěného povrchu korozivzdorné oceli po tepelném či mechanickém dělení. Nesplnění může vést ke snížení korozní odolnosti svařovaných nebo tepelně dělených částí.

3.5.3 Prostředí bazénů

Pro vypořádání se s rizikem korozní praskavosti (SCC) v prostředí bazénů je třeba pro nosné prvky v atmosféře nad halovými bazény použít výhradně tříd oceli podle tabulky 3.6.

Tabulka 3.3 Stanovení součinitele korozní odolnosti

$$CRF = F_1 + F_2 + F_3$$

F_1 Riziko vystavení chloridům slané vody nebo posypovým solím		
POZNÁMKA: M je vzdálenost od moře a S je vzdálenost od silnic s posypovou solí.		
1	Vnitřně kontrolované prostředí	
0	Nízké riziko expozice	M > 10 km nebo S > 0,1 km
-3	Střední riziko expozice	1 km < M ≤ 10 km nebo 0,01 km < S ≤ 0,1 km
-7	Vysoké riziko expozice	0,25 km < M ≤ 1 km nebo S ≤ 0,01 km
-10	Velmi vysoké riziko expozice	Silniční tunely, kde je používána rozmrazovací sůl nebo kde mohou vozidla zanést rozmrazovací sůl do tunelu
-10	Velmi vysoké riziko expozice	M ≤ 0,25 km
		Německé pobřeží Severního moře a všechny pobřežní oblasti Baltského moře
-15	Velmi vysoké riziko expozice	M ≤ 0,25 km
		Portugalské, španělské a francouzské pobřeží Atlantského oceánu. Pobřeží Lamanšského průlivu a britské, francouzské, belgické, holandské a jižní švédské pobřeží Severního moře.
F_2 Riziko vystavení oxidu siřičitému		
POZNÁMKA: Pro prostředí evropských pobřeží je běžně koncentrace oxidu siřičitého nízká. Pro prostředí vnitrozemí je koncentrace buď nízká, nebo střední. Vysoká koncentrace je neobvyklá a je spojena s místy obzvláště těžkého průmyslu nebo specifických prostředí jako např. silničních tunelů. Koncentraci oxidu siřičitého je možné stanovit podle metody uvedené v ISO 9225.		
0	Nízké riziko expozice	< 10 µg/m ³ průměrná koncentrace plynu
-5	Střední riziko expozice	10 - 90 µg/m ³ průměrná koncentrace plynu
-10	Vysoké riziko expozice	90 - 250 µg/m ³ průměrná koncentrace plynu
F_3 Režim čištění nebo vystavení oplachu deštěm (pokud $F_1 + F_2 \geq 0$, potom $F_3=0$)		
0	Plně vystaveno oplachu deštěm	
-2	Stanovený režim čištění	
-7	Není vystaveno dešti ani není stanovený režim čištění	
POZNÁMKA: Pokud musí být dílec pravidelně kontrolován s ohledem na možné známky koroze a čištění, má být tato skutečnost uživateli sdělena jednoznačně a písemně. Předepsána má být kontrola, způsob čištění i jejich četnost. Čím je čištění častější, tím je jeho přínos vyšší. Četnost nesmí být nižší než jednou za 3 měsíce. V případě předepsaného čištění je nezbytné ho provádět na všech částech konstrukce a nikoliv pouze na částech dobře přístupných a viditelných.		

Tabulka 3.4 Stanovení třídy korozní odolnosti CRC

Součinitel korozní odolnosti (CRF)	Třída korozní odolnosti (CRC)
CRF = 1	I
$0 \geq \text{CRF} > -7$	II
$-7 \geq \text{CRF} > -15$	III
$-15 \geq \text{CRF} \geq -20$	IV
$\text{CRF} < -20$	V

Tabulka 3.5 Třídy oceli podle třídy korozní odolnosti CRC

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	1.4462	1.4529
1.4512	1.4311	1.4435	1.4539	1.4547
	1.4541	1.4571		1.4410
	1.4318	1.4429		1.4501
	1.4306	1.4432		1.4507
	1.4567	1.4162		
	1.4482	1.4662		
		1.4362		
		1.4062		
		1.4578		

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.

Tabulka 3.6 Třídy oceli pro prostředí bazénových hal

Části nosné konstrukce v prostředí bazénů	Třída korozní odolnosti CRC
Nosné prvky s pravidelným čištěním ¹	CRC III nebo CRC IV (s vyloučením 1.4162, 1.4662, 1.4362, 1.4062)
Nosné prvky bez pravidelného čištění	CRC V (s vyloučením 1.4410, 1.4501 a 1.4507)
Všechny upevňovací prostředky, spojovací prostředky a části se závity	CRC V (s vyloučením 1.4410, 1.4501 a 1.4507)

¹ Pokud musí být dílec pravidelně kontrolován s ohledem na možné známky koroze a čištění, má být tato skutečnost uživateli sdělena jednoznačně v písemné formě. Předepsána má být kontrola, způsob čištění i jejich četnost. Čím je čištění častější, tím je jeho přínos vyšší. Četnost by neměla být nižší než jednou týdně. V případě předepsaného čištění je nezbytné ho provádět na všech částech konstrukce a nikoliv pouze na částech dobře přístupných a viditelných.

3.5.4 Postup pro výběr feritických tříd korozivzdorných ocelí

Feritické oceli jsou vhodné pro použití ve středně korozivním prostředí s omezeným vystavením atmosférickému znečištění a chloridům. Je zde riziko vytvoření skvrn na těchto ocelích v řadě prostředí, ale často jde pouze o kosmetickou vadu nikoliv porušení. Tabulka 3.7 nabízí konzervativní návod pro výběr třídy oceli.

Tabulka 3.7 Výběr třídy feritické oceli

Výběr třídy oceli s vysokou kvalitou povrchu (např. bez tolerance viditelných skvrn na vnějším povrchu)					
Třída	C1	C2	C3	C4	C5
1.4003	✓	✖	✖	S ohledem na chybějící data není uvedeno žádné doporučení	
1.4509	✓	✖	✖		
1.4621, 1.4521	✓	✓	✖		
Výběr třídy oceli s přípustěním kosmetické koroze (např. vytvoření skvrn a malá bodová koroze, ale bez ovlivnění celistvosti konstrukce)					
Třída	C1	C2	C3	C4	C5
1.4003	✓	(✓)	✖	S ohledem na chybějící data není uvedeno žádné doporučení	
1.4509	✓	✓	(✓)		
1.4621, 1.4521	✓	✓	✓		
Stupně korozní agresivity prostředí jsou přebrány z EN ISO 12944-2:2009 a definovány:					
Stupeň korozní agresivity a rizika	Příklady typických prostředí mírných pásem				
	Venkovní		Vnitřní		
C1 velmi nízká			Vytápěné budovy s čistou atmosférou, např. kanceláře, školy, obchody, hotely		
C2 nízká	Atmosféry s nízkou úrovní znečištění, převážně venkovské prostředí		Nevytápěné budovy, kde může docházet ke kondenzaci, např. sklady, sportovní haly		
C3 střední	Městské a průmyslové atmosféry s mírným znečištěním oxidem siřičitým. Přímořské prostředí s nízkou salinitou		Výrobní prostory s vysokou vlhkostí a malým znečištěním ovzduší, např. výroby potravin, prádelny, pivovary, mlékárny		
C4 vysoká	Průmyslové prostředí a přímořské prostředí se střední salinitou		Chemické závody, plavecké bazény, loděnice, kravíny		
C5 velmi vysoká	Průmyslové prostředí s vysokou vlhkostí a agresivní atmosférou. Přímořské prostředí s vysokou salinitou		Budovy nebo prostředí s převážně trvalou kondenzací a s vysokým znečištěním ovzduší		
Poznámky:					
✓ značí, že třída je vhodná pro daný stupeň korozní agresivity.					
✖ značí, že třída je nevhodná pro daný stupeň korozní agresivity.					
(✓) značí, že je třeba obezřetnosti při použití těchto tříd v daném prostředí. Je zde riziko skvrn a místní koroze na nechráněných svarech a kotvících prostředcích. Riziko je největší ve stojaté vodě a / nebo při akumulaci látek znečištění ovzduší (zejména chloridů).					
1. Klasifikace C1 předpokládá, že provozní prostředí je vnitřní prostředí bez přímého vystavení povětrnostním vlivům nebo chloridům. To zahrnuje části budov, jako jsou půdní prostory, obvodové stěny a ocel za opláštěním.					
2. Svary a mechanické spojovací prostředky jdoucí skrz korozivzdorné oceli vytvářejí štěrbiny, které mohou být více náchylné ke korozi než nechráněné panely. Riziko je vyšší pokud na povrchu může docházet k akumulaci vody a látek znečištění ovzduší.					
3. Definice ISO zohledňuje větrem hnané chloridy z moře, ale nikoliv ze silnic s posypovou solí. Pokud je konstrukce blízko silnicím, na kterých se používají posypové soli, projektant by měl tento fakt zohlednit.					

4 ZÁSADY NAVRHOVÁNÍ

4.1 Základní požadavky

Konstrukce by měla být navržena a vyrobena tak, aby mohla:

- Sloužit svému účelu po dobu své plánované životnosti;
- Přenést zatížení, která mohou vzniknout během výstavby, instalace a provozu;
- Lokalizovat poškození v důsledku náhodného přetížení;
- Mít přiměřenou trvanlivost ve vztahu k nákladům na údržbu.

Výše uvedené požadavky mohou být splněny použitím vhodných materiálů, vhodným návrhem konstrukce a detailů a podrobným popisem postupů a způsobů kontroly jakosti během výstavby a následné údržby konstrukce.

Konstrukce by měly být navrženy v souladu s příslušnými mezními stavy.

4.2 Navrhování podle mezních stavů

Mezní stavy jsou podmínky, při jejichž překročení konstrukce přestane splňovat požadovaná kritéria. Rozeznáváme dva základní druhy mezních stavů: mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti a dále jsou kladeny požadavky na životnost konstrukce. Mezi mezní stavy únosnosti patří ty, které v případě jejich překročení, mohou vést ke kolapsu části nebo i celé konstrukce, a tím pádem ohrožují životy lidí. Mezní stavy použitelnosti zajišťují, aby konstrukce byla schopna plnit svou funkci po dobu své životnosti. Požadavky na životnost konstrukce mohou být považovány za podmnožinu mezních stavů únosnosti a použitelnosti zohledňující například vliv koroze na únosnost konstrukce nebo její estetický vzhled.

Při návrhu konstrukce podle mezních stavů musejí být splněny následující podmínky:

$$E_d \leq R_d \quad (4.1)$$

kde:

E_d je návrhová hodnota účinků destabilizujících konstrukci, jako jsou ohybová nebo vektorová zatížení vzniklá důsledkem skutečného zatížení kladeného na konstrukci;

R_d je odpovídající hodnota návrhové únosnosti, dle příslušné části této příručky.

Hodnota návrhové únosnosti R_d je dána poměrem charakteristické hodnoty únosnosti R_k ku dílčímu součiniteli spolehlivosti γ_M , R_k/γ_M . Hodnoty dílčích součinitelů spolehlivosti γ_M mají různé hodnoty, které jsou v této příručce převzaty z norem EN 1993-1-4 a EN 1993-1-8 a jsou vypsány v tabulce 4.1. Tyto hodnoty γ_M mají být také uvažovány pro korozivzdornou ocel při návrhu podle stanov uvedených v dalších částech EN 1993, například pro mosty (EN 1993-2) nebo věže, stožáry či komíny (EN1993-3) jsou hodnoty γ_M uvedené v těchto částech nahrazeny.

Rovněž je třeba zmínit národní přílohy normy EN 1993-1-4 a dalších příslušných částí normy EN 1993 pro zemi, ve které bude navrhovaná konstrukce situována, jelikož v nich mohou být jiné hodnoty dílčích součinitelů spolehlivosti než ty uvedené v tabulce 4.1. Národní příloha ČR k normě EN 1993-1-4 přijímá

doporučené hodnoty γ_M uvedené v tabulce 4.1. (Není-li národní příloha k dispozici, hodnoty γ_M by měly být konzultovány s příslušným národním orgánem nebo institucí.)

Jako alternativu k početní analýze lze návrhové únosnosti získat ze zkoušek materiálů, prvků a konstrukcí (viz kapitola 10).

Tabulka 4.1 Doporučené hodnoty dílčích součinitelů spolehlivosti γ_M

Únosnost pro:	Značka	Hodnota (EN 1993-1-4)
Průřezy (libovolné třídy)	γ_{M0}	1,10
Prvky posuzované na stabilitu	γ_{M1}	1,10
Průřezy v tahu na mezi pevnosti	γ_{M2}	1,25
Šrouby, svary, čepy a desky v ložiskách	γ_{M2}	1,25

Pro korozivzdorné oceli, které nejsou uvedeny v tabulce 2.1 normy EN 1993-1-4, by hodnoty γ_M měly být navýšeny o 10 %.

4.3 Zatížení

Zatížení působící na konstrukci z korozivzdorné oceli by mělo být stanoveno stejným způsobem jako u konstrukce z uhlíkové oceli, tj. dle normy EN 1991.

5 ÚNOSNOST PRŮŘEZŮ

5.1 Všeobecně

Postupy pro navrhování popsané v kapitolách 5 a 6 se mají použít pouze pro průřezy s částmi vyhovujícími limitům uvedených v části 5.2.

Poměry šířky ku tloušťce částí průřezů, které jsou celé nebo částečně tlačené určují, zda jsou náchylné k lokálnímu boulení s důsledkem snížení únosnosti průřezu. Části průřezů a samotné průřezy jsou klasifikovány jako třída 1, 2, 3 a 4 v závislosti na rozsahu v jakém lokální boulení omezuje únosnost a rotační kapacitu (třída 1 a 2) průřezů, viz část 5.3..

U třídy průřezů 4 se mohou použít účinné šířky pro uvážení poklesu únosnosti v důsledku lokálního boulení, viz část 5.4.1.

Rozměry vztažené ke střednici částí průřezu se mohou použít pro výpočet průřezových charakteristik pouze u za studena tvarovaných prutů a plechů. Pro jiné průřezy se mají použít skutečné nezkreslené rozměry. EN 1993-1-3 a EN 1993-1-5 umožňují použití střednic průřezu k výpočtu únosnosti. EN 1993-1-1 navíc umožňuje použití rozměrů vtažených ke střednici při výpočtu únosnosti v určitých případech (viz 6.2.1(9) ale také 6.2.5(2) EN 1993-1-1).

5.2 Největší poměry šířky ku tloušťce

Tabulka 5.1 udává maximální hodnoty poměrů šířky ku tloušťce pro prvky z korozivzdorných ocelí.

5.3 Klasifikace průřezů

5.3.1 Všeobecně

V principu se průřezy z korozivzdorných ocelí zatřídí stejným postupem jako průřezy z ocelí uhlíkové. Definují se následující 4 třídy průřezů:

Třída průřezů 1 průřez umožňuje vytvořit plastické klouby s rotační kapacitou požadovanou při plasticitním výpočtu;

Třída průřezů 2 průřez umožňuje vytvořit plastický moment únosnosti, ale je omezena jeho rotační kapacita;

Třída průřezů 3 za předpokladu pružnostního rozdělení může napětí v krajních tlačенých vláknech ocelového prutu dosáhnout mez kluzu, ale v důsledku lokálního boulení není možné dosáhnout plastický moment únosnosti;

Třída průřezů 4 v důsledku lokálního boulení není možné dosáhnout mez kluzu v jedné nebo více částech průřezu.

Průřez se klasifikuje podle nejvyšší (nejnepříznivější) třídy jeho plně nebo částečně tlačенých částí. Je třeba poznamenat, že zatřídění průřezu závisí na poměru působícího momentu a osově síly a může se tedy lišit po délce prvku.

Tabulka 5.1 Největší poměry šířky ku tloušťce

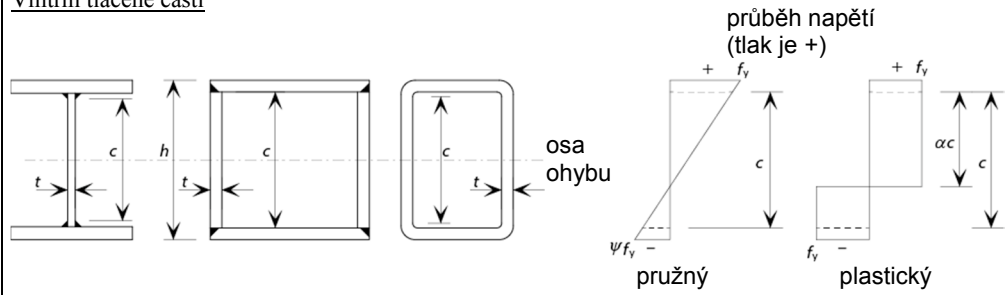
a) Přímé části, nebo části s vnitřní výztuhou podpírané na jednom konci stojinou s druhým koncem volným:	$b/t \leq 50$	
b) Přímé části, nebo části s vnitřní výztuhou podpírané na jednom konci stojinou a na druhém okrajovou výztuhou:	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$	
c) Přímé části, nebo části s vnitřní výztuhou podpírané na obou koncích stojinou nebo pásnicí:	$b/t \leq 400$	
	$h/t \leq 400$	
Poznámka: Přímé části podporované jako v případě a) s poměrem b/t větším než přibližně 30 a přímé části podporované jiným způsobem s poměrem b/t větším než přibližně 75 budou pravděpodobně vykazovat viditelné zakřivení při zatížení odpovídajícím meznímu stavu použitelnosti.		

5.3.2 Klasifikační limity částí průřezu

Limitní rozměry tlačených částí průřezu třídy 1, 2 a 3 se mají získat z tabulky 5.2. Část průřezu, která nesplňuje požadavky pro třídu 3, se má klasifikovat jako třída 4.

Tabulka 5.2 Největší poměry šířky a tloušťky tlačných částí

Vnitřní tlačné části



Třída průřezu	Ohýbaná část	Tlačná část	Tlačná a ohýbaná část	
1	$c/t \leq 72,0\varepsilon$	$c/t \leq 33,0\varepsilon$	$\alpha > 0,5$: osa ohybu 1) $c/t \leq 396,0\varepsilon$ $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq 36,0\varepsilon/\alpha$	
2	$c/t \leq 76,0\varepsilon$	$c/t \leq 35,0\varepsilon$	$\alpha > 0,5$: $c/t \leq 420,0\varepsilon/(13\alpha - 1)$ $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq 38,0\varepsilon/\alpha$	
3	$c/t \leq 90,0\varepsilon$	$c/t \leq 37,0\varepsilon$	$c/t \leq 18,5\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ pro k_σ viz 4.4.1	
$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Třída	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ε	1,03	1,01	0,698

Poznámky:

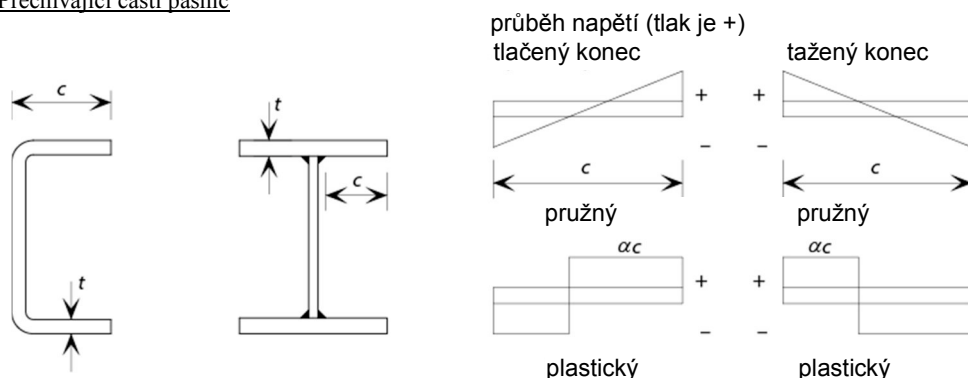
Pro uzavřené průřezy může být c uvažováno jako $(h - 3t)$ nebo $(b - 3t)$

$E = 200 \times 10^3$ N/mm²

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right) \quad \text{pro průřezy symetrické k hlavní ose}$$

Tabulka 5.2 (pokračování) Největší poměry šířky a tloušťky tlačných částí

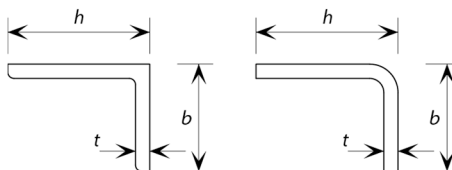
Přečnivající části pásnic



Třída průřezu	Typ průřezu	Tlačná část	Tlačná a ohýbaná část	
			Tlačný konec	Tažený konec
1	Tvarované za studena a svařované	$c/t \leq 9,0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	Tvarované za studena a svařované	$c/t \leq 10,0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10,0\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,0\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
3	Tvarované za studena a svařované	$c/t \leq 14,0\varepsilon$	$c/t \leq 21,0\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ pro k_σ viz 5.4.1.	

Úhelníky

Odkazuje se na přečnivající části pásnic



Netýká se úhelníků souvisle podporovaných jinými prvky.

Třída průřezu	Tlačný průřez			
3	$\frac{h}{t} \leq 15,0\varepsilon ; \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$			
$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Třída	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ε	1,03	1,01	0,698

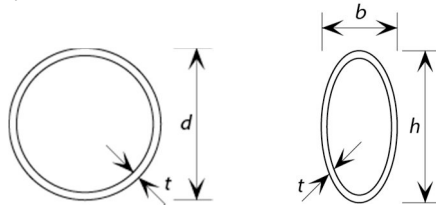
Poznámky:

Pro za studena tvarované U průřezy může být použit méně konzervativní postup kdy $c = b_p$, kde b_p je vzdálenost od konce pásnice do středu zaobleného rohu (viz obrázek 5.5)

$E = 200 \times 10^3$ N/mm²

Tabulka 5.2 (pokračování) Největší poměry šířky a tloušťky tlačných částí

Trubky



Třída průřezu	Ohýbaný průřez	Tlačný průřez		
1	$d_e/t \leq 50\varepsilon^2$	$d_e/t \leq 50\varepsilon^2$		
2	$d_e/t \leq 70\varepsilon^2$	$d_e/t \leq 70\varepsilon^2$		
3	$d_e/t \leq 280\varepsilon^2$ pro $d_e > 240$ mm a/nebo $d_e/t > 280\varepsilon^2$, viz EN 1993-1-6	$d_e/t \leq 90\varepsilon^2$ pro $d_e/t > 90\varepsilon^2$, viz EN 1993-1-6		
$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Třída	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ε	1,03	1,01	0,698

Poznámky:

$$E = 200 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

d_e je ekvivalentní průměr. Pro kruhové uzavřené průřezy $d_e = d$.

Pro eliptické uzavřené průřezy d_e závisí na způsobu zatížení:

Pro eliptické uzavřené průřezy v tlaku:

$$d_e = h \left[1 + \left\{ 1 - 2,3 \left(\frac{t}{h} \right)^{0,6} \right\} \left(\frac{h}{b} - 1 \right) \right] \quad \text{nebo konzervativně} \quad d_e = \frac{h^2}{b}$$

Pro eliptické uzavřené průřezy ohýbané k hlavní ose (y-y):

$$\text{Když } \frac{h}{b} \leq 1,36 \quad d_e = \frac{b^2}{h}$$

$$\text{Když } \frac{h}{b} > 1,36 \quad d_e = 0,4 \frac{h^2}{b}$$

Pro eliptické uzavřené průřezy ohýbané k vedlejší ose (z-z) nebo namáhané kombinací tlaku a ohybu k vedlejší ose:

$$d_e = \frac{h^2}{b}$$

Pro eliptické uzavřené průřezy v tlaku a ohybu k hlavní ose (y-y) může být d_e stanoven lineární interpolací mezi ekvivalentním průměrem pro tlak a pro ohyb na základě α pro třídy průřezu 1 a 2 a na základě ψ pro třídy průřezu 3 a 4.

5.4 Účinné šířky

5.4.1 Účinná šířka částí průřezu třídy 4

Vlastnosti průřezů třídy 4 se mají stanovit výpočtem uvažujícím účinnou šířku jednotlivých částí průřezu, které jsou plně nebo částečně tlačné. Variantně lze využít navrhování s pomocí zkoušek, viz kapitola 10.

Účinná plocha průřezů třídy 4, které jsou plně nebo částečně tlačné je plochou celého průřezu s odečtením neúčinných zón všech štíhlých alespoň částečně

tlačených částí ze kterých se průřez skládá. Účinná plocha každé jednotlivé průřezové části třídy 4 je stanovena jako příslušná účinná šířka b_{eff} násobená tloušťkou. Pokud je průřez ohýbaný, je třeba rovněž stanovit účinný moment setrvačnosti I_{eff} a průřezový modul W_{eff} .

Účinná šířka částí plně nebo částečně tlačených lze stanovit na základě tabulky 5.3 pro vnitřní tlačení části a 5.4 pro přečnívající tlačené části.

Účinná šířka tlačené pásnice může být stanovena na základě poměru napětí ψ vypočítaných s uvažováním celého průřezu (ψ je definováno v tab. 5.3 a 5.4). Účinná šířka stojiny má být stanovena na základě poměru napětí ψ vypočítaném na průřezu uvažujícím účinnou šířku tlačené pásnice ale plnou plochu stojiny a tažené pásnice.

Součinitel boulení ρ lze stanovit následovně:

Vnitřní tlačené části (za studena tvářené nebo svařované):

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{ale } \leq 1,0 \quad (5.1)$$

přečnívající tlačené části (za studena tvářené nebo svařované):

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{ale } \leq 1,0 \quad (5.2)$$

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

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (5.3)$$

ve které:

- t je příslušná tloušťka;
- k_σ je součinitel kritického napětí odpovídající poměru napětí ψ a okrajovým podmínkám podle tab. 5.3 a 5.4;
- \bar{b} je příslušná šířka podle následujícího:
 - $\bar{b} = d$ pro stojiny s výjimkou stojin uzavřených čtverhranných profilů;
 - $\bar{b} = h - 3t$ pro stojiny uzavřených čtverhranných profilů;
 - $\bar{b} = b$ pro vnitřní části pásnic s výjimkou uzavřených čtverhranných profilů;
 - $\bar{b} = b - 3t$ pro vnitřní části pásnic uzavřených čtverhranných profilů;
 - $\bar{b} = c$ pro přečnívající pásnice;
 - $\bar{b} = h$ pro rovnoramenné a nerovnoramenné úhelníky;
- ε je materiálový součinitel definovaný v tabulce 5.2.

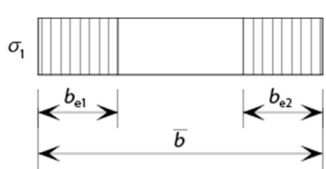
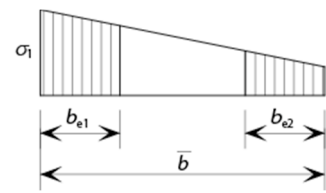
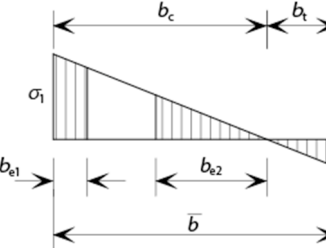
EN 1993-1-4 udává, že \bar{b} pro stojiny a pásnice čtverhranných uzavřených profilů může být konzervativně uvažováno jako $h - 2t$ resp. $b - 2t$. V další revizi normy EN 1993-1-4 se očekává změna těchto hodnot na $h - 3t$ a $b - 3t$, tedy shodně s definicí EN 1993-1-5.

Pro za studena tvarované otevřené průřezy může být použit méně konzervativní postup, kdy $\bar{b} = b_p$, kde b_p je šířka přímé části vztažená ke středům zaoblených rohů (viz obrázek 5.5).

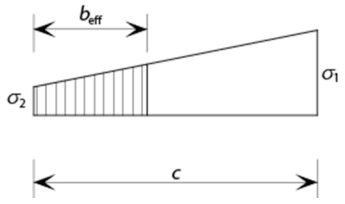
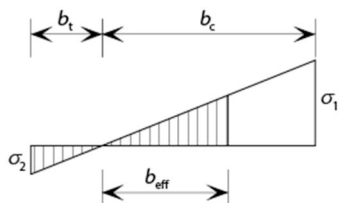
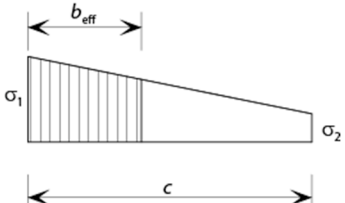
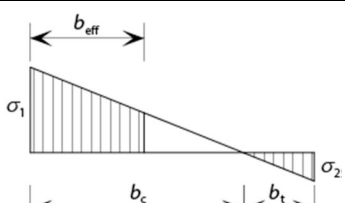
Obecně může dojít k posunu neutrální osy průřezu e vzhledem k poloze neutrální osy plného průřezu, viz obrázky 5.1 a 5.2. Tento posun musí být při stanovení účinného průřezu zohledněn.

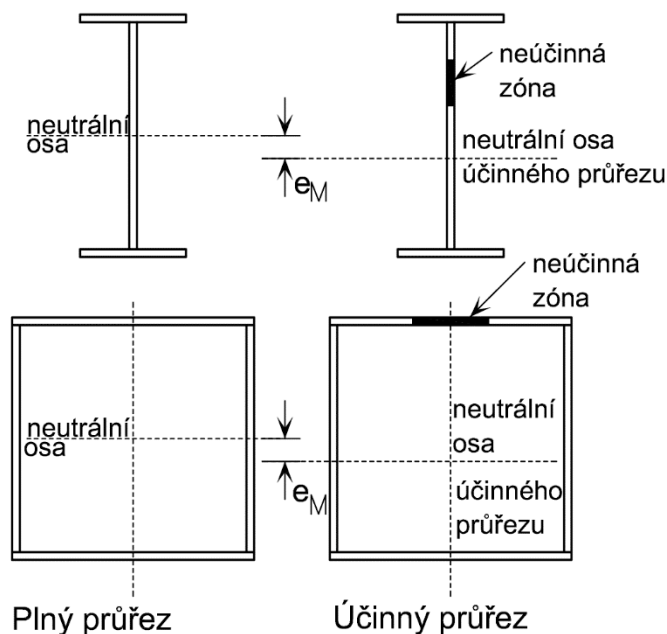
Pokud je průřez vystaven tlakové síle, doporučení v části 6.5.2 uvažují při posouzení ohybový moment $\Delta M_{Ed} = N_{Ed} e_N$, kde e_N je posun neutrální osy u rovnoměrně tláčeného průřezu., viz obrázek 5.2.

Tabulka 5.3 Vnitřní tlačené části

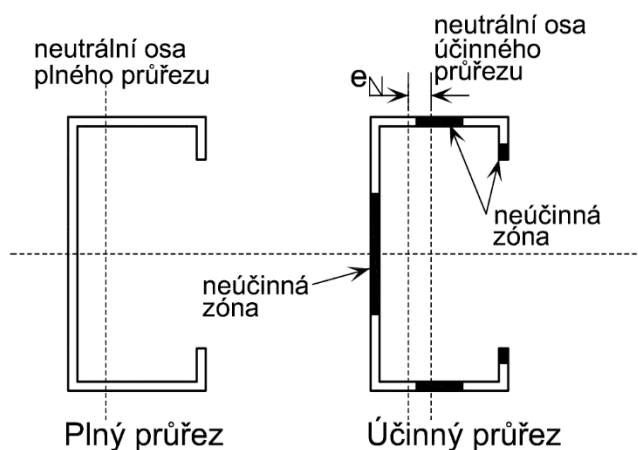
Průběh napětí (tlak označen kladně)				Účinná šířka b_{eff}		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2 b_{eff}}{5 - \psi}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$
Součinitel kritického napětí k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Tabulka 5.4 Přechnávající tlačené části

Průběh napětí (tlak označen kladně)			Účinná šířka b_{eff}		
			$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho c$		
			$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$+1 \geq \psi \geq -3$	
Součinitel kritického napětí k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
			$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c$		
			$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Součinitel kritického napětí k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8



Obrázek 5.1 Průřezy třídy 4 – ohybový moment



Obrázek 5.2 Průřez třídy 4 – osová síla

5.4.2 Účinek smykového ochabnutí

Smykové ochabnutí v pásnicích lze zanedbat pokud $b_0 < L_e/50$, kde b_0 je přečnívající část pásnice nebo polovina šířky vnitřní části a L_e je délka mezi body s nulovým momentem. Kde je tento limit pro b_0 překročen, má se účinek smykového ochabnutí v pásnicích uvažovat podle pravidel pro uhlíkové oceli v EN 1993-1-5. Podle této normy se má účinek smykového ochabnutí uvažovat pro mezní stav únosnosti i použitelnosti.

5.4.3 Zvlnění pásnice

Vliv zvlnění velmi široké pásnice (tzn. vliv zakřivení pásnice směrem k neutrální ose) na únosnost průřezu namáhaného ohybem, nebo konkávní tlačené pásnice zakřiveného prutu namáhaného ohybem, se má vzít v úvahu, jestliže je zvlnění pásnice větší než 5 % výšky průřezu. V takovém případě se zmenšení únosnosti (např. v důsledku toho, že se části širokých pásnic dostanou blíž k neutrální ose) a možný vliv příčného ohybu stojin mají vzít v úvahu.

Poměry šířky ku tloušťce u pásnic běžných pro nosníky z korozivzdorných ocelí nebudou pravděpodobně vést ke zvlnění pásnice. Pokud je potřeba, použijí se pravidla pro uhlíkové oceli v normě EN 1993-1-3.

5.5 Výztuhy částí průřezu

5.5.1 Okrajové výztuhy

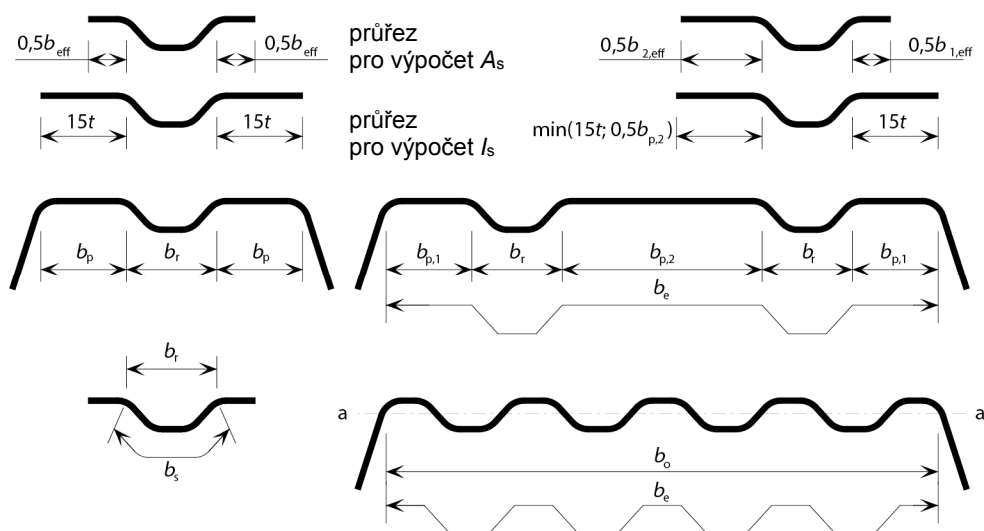
Použijí se pravidla pro uhlíkové oceli v EN 1993-1-3.

5.5.2 Vnitřní výztuhy

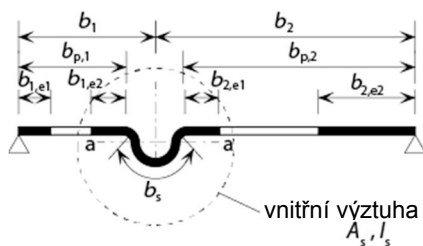
Použijí se pravidla pro uhlíkové oceli v EN 1993-1-3.

5.5.3 Trapézové plošné profily s vnitřními výztuhami pásnic

Je-li pásnice vystavena rovnoměrnému tlaku, má se účinný průřez pásnice s vnitřními výztuhami složit z redukovaných účinných ploch $A_{s,red}$ a dvou pásů šířky $0,5b_{eff}$ nebo $15t$ přilehlých k výztuze, viz obrázek 5.3 a 5.4.



Obrázek 5.3 Tlačená pásnice s jednou, dvěma nebo více výztuhami



Obrázek 5.4 Vnitřní výztuha

Pro jednu výztuhu uprostřed se má pružné kritické napětí $\sigma_{cr,s}$ (použité pro stanovení $\bar{\lambda}_d$) získat ze vztahu:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}} \quad (5.4)$$

kde:

- b_p je výchozí šířka rovinné části;
 b_s je šířka výztuhy měřená po obvodu výztuhy;
 A_s je plocha průřezu výztuhy;
 I_s je moment setrvačnosti průřezu výztuhy;

Tyto parametry jsou definovány na obrázcích 5.3, 5.4 a 5.5.

- k_w je součinitel vyjadřující vliv částečného rotačního podepření pásnice stojinou nebo jinými přilehlými částmi, viz níže. Pro výpočet účinného průřezu v tlaku je hodnota $k_w = 1,0$.

Pro dvě symetricky umístěné výztuhy pásnice se má pružné kritické napětí $\sigma_{cr,s}$ získat ze vztahu:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{8b_1^2(3b_e - 4b_1)}} \quad (5.5)$$

kde:

$$b_e = 2b_{p,1} + b_{p,2} + 2b_s \quad (5.6)$$

$$b_1 = b_{p,1} + 0,5b_r \quad (5.7)$$

příčemž:

- $b_{p,1}$ je výchozí šířka vnější rovinné části viz obr. 5.4;

- $b_{p,2}$ je výchozí šířka střední rovinné části viz obr. 5.4;

- b_r je celková šířka výztuhy viz obr. 5.3.

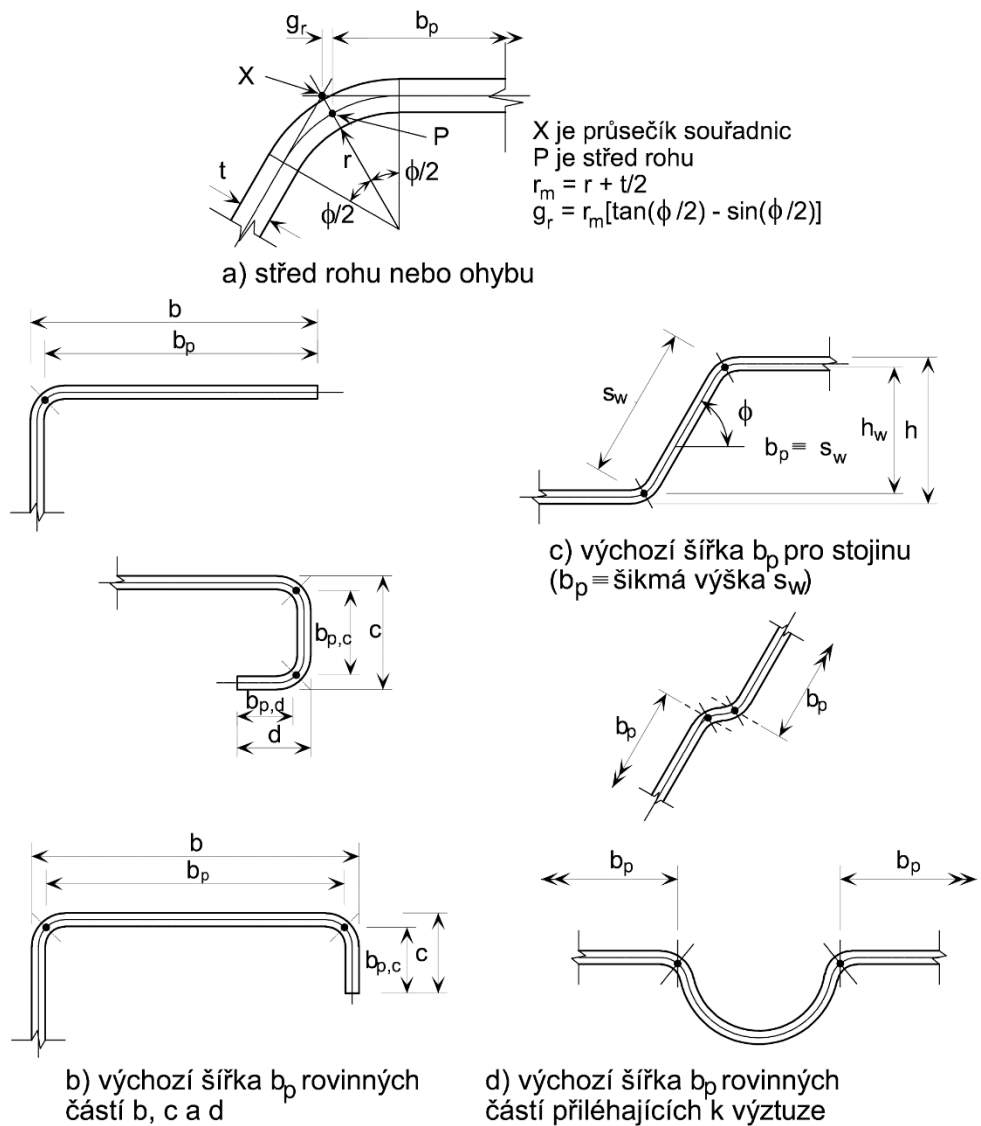
Hodnotu k_w lze vypočítat z délky vlny l_b vyboulené pásnice následovně:

$$\frac{l_b}{s_w} \geq 2, \quad k_w = k_{w0} \quad (5.8)$$

$$\frac{l_b}{s_w} < 2, \quad k_w = k_{w0} - (k_{w0} - 1) \left[\frac{2l_b}{s_w} - \left(\frac{l_b}{s_w} \right)^2 \right] \quad (5.9)$$

kde:

- s_w je šikmá výška stojiny podle obrázku 5.5.



Obrázek 5.5 Výchozí šířky rovinných částí příčného řezu b_p se zaoblenými rohy

Alternativně lze konzervativní hodnotu součinitele rotačního podepření k_w brát rovnou 1,0, což odpovídá kloubovému podepření.

Veličiny l_b a k_{wo} lze určit následovně:

a) pro tlačenu pásnici s jednou vnitřní výztuhou:

$$l_b = 3,07 \sqrt[4]{\frac{I_s b_p^2 (2b_p + 3b_s)}{t^3}} \quad (5.10)$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} \quad (5.11)$$

$$b_d = 2b_p + b_s \quad (5.12)$$

b) pro tlačenu pásnici se dvěma vnitřními výztuhami:

$$l_b = 3,65 \sqrt[4]{\frac{I_s b_1^2 (3b_e - 4b_1)}{t^3}} \quad (5.13)$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{(2b_e + s_w)(3b_e - 4b_1)}{b_1(4b_e - 6b_1) + s_w(3b_e - 4b_1)}} \quad (5.14)$$

Redukovaná účinná plocha výztuhy $A_{s,red}$ pro distorzní ztrátu stability (rovinné vybočení vnitřní výztuhy) se má uvažovat jako:

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \quad \text{ale} \quad A_{s,red} \leq A_s \quad (5.15)$$

kde:

$\sigma_{com,Ed}$ je tlakové napětí určené na základě účinného průřezu pro těžiště výztuhy.

Pokud jsou stojiny nevyztužené, součinitel vzpěrnosti pro únosnost v distorzním vybočení χ_d se má stanovit ze vztahů:

$$\bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad \chi_d = 1,0 \quad (5.16)$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d \quad (5.17)$$

$$\bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad \chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad (5.18)$$

$$\text{kde } \bar{\lambda}_d = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,s}}$$

Pokud jsou stojiny s výztuhami, má se využít postupů v EN 1993-1-3.

Při výpočtu vlastností účinného průřezu se má redukovaná účinná plocha $A_{s,red}$ vyjádřit zavedením redukované tloušťky $t_{red} = t (A_{red} / A_s)$ pro všechny části zahrnuté v A_s .

5.6 Výpočet průřezových charakteristik

5.6.1 Všeobecně

Výpočet průřezových charakteristik se provede v souladu se správnou, zavedenou praxí, přičemž je třeba zohlednit jakoukoliv redukci průřezové plochy, např. vlivem lokálního boulení nebo otvory pro šrouby dle konkrétního případu.

5.6.2 Vliv zaoblení v rozích

Vliv zaoblení v rozích průřezu na únosnost průřezu se může zanedbat, je-li vnitřní poloměr $r \leq 5t$ a $r \leq 0,10b_p$. Potom se dá předpokládat, že příčný řez se sestává z rovinných částí s ostrými rohy. Při stanovení průřezových hodnot potřebných pro stanovení tuhosti se vliv zaoblení v rozích má uvažovat vždy.

Vliv zaoblených rohů na průřezové hodnoty lze zahrnout do výpočtu redukováním vlastností vypočítaných pro jinak podobný příčný řez, ale s ostrými rohy, viz obrázek 5.6, s použitím následujících aproximací:

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) \quad (5.19)$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) \quad (5.20)$$

$$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) \quad (5.21)$$

kde:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad (5.22)$$

přičemž:

A_g je plná plocha průřezu;

$A_{g,sh}$ je hodnota A_g pro ostrohanný průřez;

$b_{p,i}$ je výchozí šířka i -té rovinné části pro ostrohanný průřez;

I_g je moment setrvačnosti plného průřezu;

$I_{g,sh}$ je hodnota I_g pro ostrohanný průřez;

I_w je výsečový moment setrvačnosti plného průřezu;

$I_{w,sh}$ je hodnota I_w pro ostrohanný průřez;

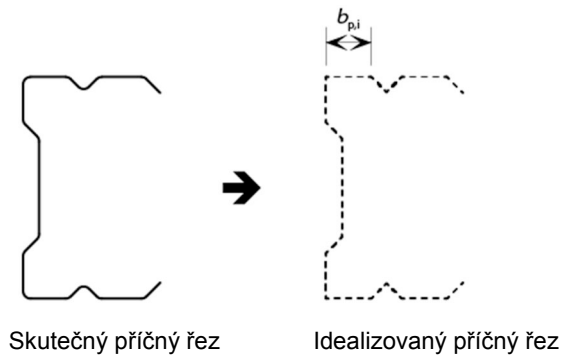
ϕ_j je úhel mezi dvěma rovinnými částmi j ;

m je počet rovinných částí;

n je počet zaoblených částí;

r_j je vnitřní poloměr zaoblených částí j .

Redukce daná výše uvedeným vztahem se může uplatnit i při výpočtu průřezových hodnot účinného průřezu A_{eff} , $I_{y,eff}$, $I_{z,eff}$ a $I_{w,eff}$ za předpokladu, že výchozí šířky rovinných částí se měří mezi průsečíky střednic.



Obrázek 5.6 Přibližné nahrazení zaoblených rohů

5.6.3 Neoslabený průřez

Vlastnosti neoslabeného průřezu se mají stanovit s použitím jmenovitých rozměrů. Díry pro spojovací prostředky není potřebné odečítat, má se však brát zřetel na větší otvory.

5.6.4 Oslabená plocha průřezu

Oslabená plocha průřezu se má uvažovat jako plocha neoslabeného průřezu, zmenšená vhodným způsobem o všechny díry a jiné otvory. Při oslabení dírami pro spojovací prostředky, se má počítat s nominálním průměrem takové díry.

Jestliže díry pro spojovací prostředky nejsou vystřídáné, má se celková plocha oslabení určit jako největší součet průřezových ploch děr v libovolném řezu kolmém k ose prutu (viz čára porušení na obr. 5.7).

Jestliže jsou díry pro spojovací prostředky vystřídáné, má se celková plocha oslabení určit jako větší z hodnot:

- oslabení pro nevystřídáné díry

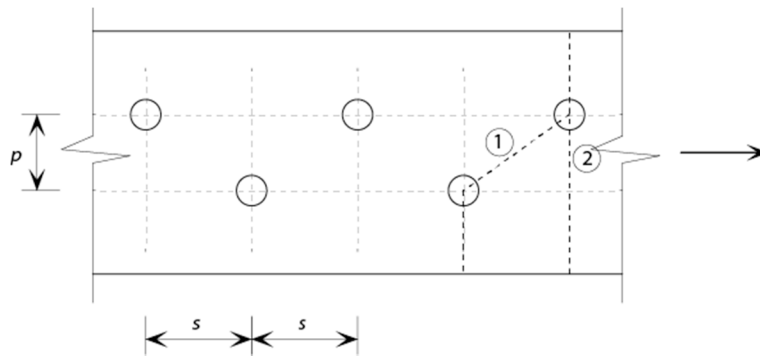
- $t \left(nd_0 - \sum \left[\frac{s^2}{4p} \right] \right)$

kde:

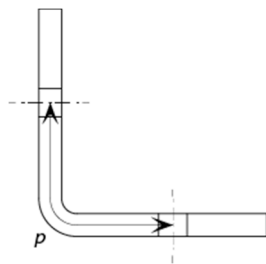
- s je rozteč vystřídáných děr, která se rovná vzdálenosti středů dvou děr v sousedních řadách, měřená rovnoběžně s osou prutu;
- p je rozteč středů dvou děr v sousedních řadách, měřená kolmo k ose prutu;
- t je tloušťka;
- n je počet děr v libovolné šikmé nebo lomené čáře po šířce prutu nebo části prutu, viz obr. 5.7;
- d_0 je průměr díry.

U úhelníků nebo jiných průřezů s dírami ve více než jedné rovině, se má rozteč p měřit uprostřed tloušťky materiálu, viz obrázek 5.8.

Pro úhelníky připojené jedním ramenem se odkazuje na část 7.2.



Obrázek 5.7 Vystřídání děr a rozhodující lomové čáry 1 a 2



Obrázek 5.8 Rozteč pro úhelník s dírami v obou ramenech

5.7 Únosnost průřezů

5.7.1 Všeobecně

Tato část se věnuje únosnosti samotného průřezu. Posouzení případných vybočení prvku je rovněž nezbytné pro stanovení únosnosti prvku a je uvedeno v kapitole 6. Součinitele spolehlivosti γ_M použité v této části jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tváření spojené s výrobou za studena tvarovaných průřezů (viz část 2.2.1) obecně vede ke zvýšení únosnosti průřezu. Návod na využití tohoto zvýšení způsobeného výrobou je uveden v Příloze B.

Zvýšená návrhová únosnost průřezu vlivem příznivého zpevnění materiálu může být zohledněna v návrhu pomocí metody CSM popsané v Příloze D.

Alternativně je možné zahrnout příznivý vliv zpevnění materiálu pomocí zkoušek (viz kapitola 10).

5.7.2 Tažené průřezy

Návrhová únosnost průřezu v rovnoměrném tahu $N_{t,Rd}$, se má stanovit jako menší z:

a) plastická návrhová únosnost neoslabeného průřezu

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.23)$$

b) návrhová únosnost oslabeného průřezu v místě děr pro spojovací prostředky:

$$N_{u,Rd} = \frac{k A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.24)$$

kde:

- A_g je plná plocha průřezu;
- A_{net} je plocha oslabeného průřezu (viz část 5.6.4);
- f_y je jmenovitá hodnota meze kluzu (obecně uvažovaná jako nejnižší specifikované napětí při poměrném plastickém přetvoření 0,2%, viz tabulka 2.2);
- f_u je jmenovitá hodnota meze pevnosti (obecně uvažovaná nejnižší specifikovanou hodnotou, viz tabulka 2.2);
- k je součinitel závislý na způsobu výroby díry a způsobu zatížení:
 - $k = 1,0$ pro průřezy s hladkými dírami (t.j. díry bez vrubů), např. díry vyráběné vrtáním nebo řezáním vodním paprskem;
 - $k = 0,9$ pro průřezy s hrubými dírami (j.t. díry s vruby), např. díry vyráběné prorážením nebo řezáním plamenem;
 - $k = 0,9$ pro konstrukce navrhované na únavu.

Předpokládá se, že rovnice (5.24) bude zavedena v další revizi normy EN 1993-1-1 pro uhlíkové oceli a ukázalo se, že je použitelná i pro korozivzdorné oceli. EN 1993-1-4 v současnosti uvádí konzervativnější vztah původně z EN 1993-1-3:

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.25)$$

kde:

$$k_r = [1 + 3r(d_0/u - 0,3)] \quad (5.26)$$

příčemž:

- r = (počet šroubů v příčném řezu) / (celkový počet šroubů ve spoji);
- d_0 je jmenovitý průměr díry pro šroub;
- u = $2e_2$ ale $u \leq p_2$;
- e_2 je vzdálenost od středu díry pro šroub k okraji prvku ve směru kolmém na směr namáhání;
- p_2 je rozteč děr pro šrouby ve směru kolmém na směr namáhání.

5.7.3 Tlačené průřezy

Návrhová únosnost průřezu v prostém tlaku $N_{c,Rd}$, kde výslednice prochází těžištěm plochy plného průřezu (třída průřezu 1, 2 a 3) nebo plochy účinného průřezu (třída průřezu 4) se má stanovit z výrazu:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0} \quad \text{pro průřezy třídy 1, 2 nebo 3} \quad (5.27)$$

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{pro průřezy třídy 4} \quad (5.28)$$

Pozn.: U nesymetrických průřezů třídy 4 se má postupovat podle 5.7.6 a uvažovat přidavný moment ΔM_{Ed} , plynoucí z posunu těžišťové osy účinného průřezu, viz část 5.4.1.

5.7.4 Ohýbané průřezy

Při absenci smyku a osově síly se návrhová únosnost v ohybu $M_{c,Rd}$ k některé hlavní ose průřezu stanoví z výrazů:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{pro průřezy třídy 1 nebo 2} \quad (5.29)$$

$$M_{c,Rd} = W_{el,min} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{pro průřezy třídy 3} \quad (5.30)$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{pro průřezy třídy 4} \quad (5.31)$$

kde:

W_{pl} je plastický průřezový modul;

$W_{el,min}$ je pružný průřezový modul, odpovídající vláknům s největším pružným napětím (pro za studena tvářené průřezy pak viz část 5.1)

$W_{eff,min}$ je pružný průřezový modul účinného průřezu, odpovídající vláknům s největším pružným napětím (pro za studena tvářené průřezy pak viz část 5.1).

Při ohybu okolo obou os průřezu se má použít postup podle části 5.7.6.

5.7.5 Průřezy ve smyku

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

$$V_{pl,Rd} = \left(\frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \right) \quad (5.32)$$

kde A_v je smyková plocha.

Vztahy pro stanovení smykové plochy udává tabulka 5.5.

Tabulka 5.5 Smyková plocha A_v pro různé průřezy

Průřez	Smyková plocha A_v
válcované I a H průřezy, zatížené rovnoběžně se stojinou	$A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$ ale nejméně $\eta h_w t_w$
válcované U průřezy, zatížené rovnoběžně se stojinou	$A - 2bt_f + (t_w + r)t_f$
válcované T průřezy, zatížené rovnoběžně se stojinou	$0,9(A - bt_f)$
svařované I, H a pravouhlé uzavřené průřezy, zatížené rovnoběžně se stojinami	$\eta \sum(h_w t_w)$
svařované I, H, U a pravouhlé uzavřené průřezy, zatížené rovnoběžně s pásnicemi	$A - \sum(h_w t_w)$
válcované pravouhlé uzavřené průřezy s konstantní tloušťkou stěny zatížené rovnoběžně	s výškou: $Ah/(b + h)$ se šířkou: $Ab/(b + h)$
kruhové uzavřené průřezy s konstantní tloušťkou stěny	$2A/\pi$
eliptické uzavřené průřezy s konstantní tloušťkou zatížené rovnoběžně s výškou	$2(h - t)/t$
eliptické uzavřené průřezy s konstantní tloušťkou zatížené rovnoběžně se šířkou	$2(b - t)/t$

kde:

- A je průřezová plocha;
- b je celková šířka;
- h je celková výška;
- h_w je výška stojiny;
- r je poloměr zaoblení;
- t_f je tloušťka pásnice;
- t_w je tloušťka stojiny (jestliže není konstantní, má se uvažovat nejmenší tloušťka);
- η viz EN 1993-1-5 (EN 1993-1-4 doporučuje $\eta = 1,20$).

Poznámka: Stejná hodnota η by měla být použita pro stanovení únosnosti s boulením ve smyku stejně jako plastickou únosnost ve smyku.

Únosnost s boulením ve smyku se musí rovněž posoudit, viz část 6.4.3.

5.7.6 Průřezy namáhané kombinací zatížení

Při působení osově síly se u stanovení plastické únosnosti průřezu má uvažovat její účinek. Pro průřezy třídy 1 a 2 musí být splněna podmínka:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (5.33)$$

kde $M_{N,Rd}$ je návrhový plastický moment únosnosti, redukováný v důsledku působení osově síly N_{Ed} .

Pro dvojose symetrické I a H průřezy nebo jiné průřezy s pásnicemi není nutné uvažovat účinek osově síly na plastický moment únosnosti při ohybu okolo osy $y-y$, jestliže jsou splněny obě následující podmínky:

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad (5.34)$$

$$N_{Ed} \leq 0,5h_w t_w f_y / \gamma_{M0} \quad (5.35)$$

Když nepůsobí smyková síla, pak pro průřezy třídy 3 a 4 musí největší podélné normálové napětí vyhovovat podmínce:

$$\sigma_{x,Ed} \leq f_y / \gamma_{M0} \quad (5.36)$$

kde:

$\sigma_{x,Ed}$ je návrhová hodnota místního podélného napětí od momentu a osově síly, určená podle potřeby s uvažováním děr pro šrouby.

Pro průřezy třídy 4 má být splněna rovněž podmínka:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (5.37)$$

kde:

A_{eff} je účinná plocha rovnoměrně tlačенého průřezu;

$W_{eff,y,min}$ je účinný modul průřezu (odpovídající vláknu s největším pružným napětím), který je namáhán pouze momentem okolo příslušné osy;

e_N je posun příslušné těžišťové osy rovnoměrně tlačенého průřezu.

Pro úhelníky se místo os y a z ve výše uvedených vztazích použijí osy u a v .

Jestliže smyková síla V_{Ed} přesahuje 50 % plastické smykové únosnosti $V_{pl,Rd}$, stanoví se návrhová únosnost průřezu s použitím redukované meze kluzu $(1 - \rho) f_y$ pro smykovou plochu, kde $\rho = (2V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2$.

6 NAVRHOVÁNÍ PRVKŮ

6.1 Úvod

Podmínky spolehlivosti prutů z korozivzdorné oceli jsou podobné těm pro uhlíkové oceli. Doporučuje se, aby vnitřní síly (normálové síly, smykové síly a ohybové momenty) jednotlivých prvků byly odvozeny z pružné globální analýzy.

Kromě únosnosti průřezu, viz kapitola 5, je nutné posoudit, dle pokynů v této kapitole, možnost ztráty stability celého prutu.

Jedním z možných přístupů pro posouzení stability prutů z korozivzdorné oceli je využití tečného modulu pružnosti odpovídajícího kritickému napětí namísto počátečního modulu pružnosti používaného v případě uhlíkové oceli. Uvažování stejných geometrických imperfekcí a reziduálních pnutí prutů z uhlíkové a korozivzdorné oceli obvykle vede k uspokojivým výsledkům, pokud jsou získány na základě platných pravidel pro uhlíkovou ocel. Tento postup však vyžaduje iterativní řešení, a proto, krom případů kdy byl použit k odvození účinných návrhových křivek s počátečním modulem pružnosti, není zahrnut v této příručce. Namísto toho byl kladen důraz na kalibraci provedenou na základě dostupných experimentálních dat.

Následující podkapitoly jsou určeny pro jednoose, dvojose nebo středově symetrické průřezy. Únosnost prutů, které nemají žádnou osu symetrie, by měla být ověřena vhodnými zkouškami.

6.2 Tah

Pruty namáhané čistým tahem nejsou náchylné na ztrátu stability. Jejich návrh proto může být založen pouze na únosnosti průřezu, viz část 5.7.2, a únosnosti jejich spojů, viz kapitola 7.

Pro úhelníky spojené jedním ramenem a pro ostatní nesymetricky spojené prvky musí platit:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} \leq N_{u,Rd} \quad (6.1)$$

Podmínky jsou uvedeny v části 5.7.2 a hodnota $N_{u,Rd}$ je definována v části 7.2.3.

6.3 Tlak

6.3.1 Obecné informace

Prvky namáhané tlakem mohou být náchylné na několik druhů ztráty stability, a to:

- Boulení stěn (pouze průřezy 4. třídy);
- Rovinný vzpěr;
- Vzpěr zkroucením;
- Prostorový vzpěr.

Dvojose symetrické průřezy (TR, HTR, I průřezy, atd.)

Dvojose symetrické průřezy nemusí být posuzovány na prostorový vzpěr, protože střed smyku se shoduje s těžištěm průřezu. Avšak vzpěr zkroucením může být rozhodující.

Kruhové a čtvercové uzavřené průřezy nejsou náchylné na vzpěr zkroucením.

Pro většinu prutů čtyřhranných dutých průřezů používaných ve stavebnictví není vzpěr zkroucením kritický. Je ho ale třeba vzít v úvahu u průřezů s neobvykle vysokou hodnotou poměru h/b .

Jednoose symetrické průřezy (rovnoramenné úhelníky, U průřezy atd.)

U jednoose symetrických průřezů, jako jsou rovnoramenné úhelníky a U průřezy, je nutné posoudit vliv prostorového vzpěru, protože střed smyku se neshoduje s polohou těžiště průřezu.

Středově symetrické průřezy (Z průřezy, křížové průřezy, atd.)

U těchto průřezů může být rozhodující vzpěr zkroucením.

6.3.2 Boulení stěn

Boulení stěn průřezů 4. třídy je zohledněno uvažováním účinné plochy průřezu. Ve výpočtu je nutné uvažovat ohybový moment ΔM_{Ed} , který může, při uvažování účinného průřezu 4. třídy, vzniknout v důsledku posunutí těžiště, viz část 6.5.

6.3.3 Rovinný vzpěr

Návrhová vzpěrná únosnost tlačенého prutu se má určit z výrazu:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} \quad \text{pro průřezy třídy 1, 2 a 3} \quad (6.2)$$

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad \text{pro průřezy třídy 4} \quad (6.3)$$

kde:

A je plocha průřezu;

A_{eff} je účinná plocha průřezů 4. třídy;

χ je součinitel vzpěrnosti, podle vztahu:

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (6.4)$$

ve kterém:

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) \quad (6.5)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{pro průřezy třídy 1, 2 a 3} \quad (6.6)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr}}}} = \frac{L_{\text{cr}}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E} \frac{A_{\text{eff}}}{A}} \quad \text{pro průřezy třídy 4} \quad (6.7)$$

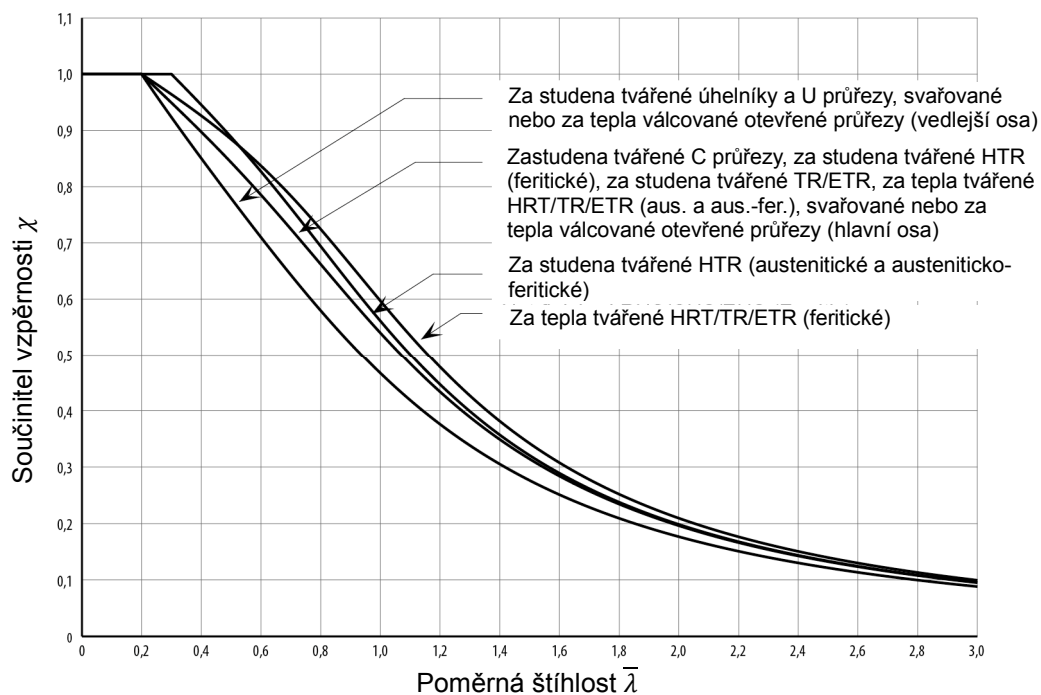
kde:

- α je součinitel imperfekce dle tabulky 6.1;
- N_{cr} je pružná kritická síla pro příslušný způsob vybočení, určena pro vlastnosti plného průřezu;
- $\bar{\lambda}_0$ je hraniční štíhlost dle tabulky 6.1;
- L_{cr} je vzpěrná délka v uvažované rovině vzpěru. Stanovení vzpěrné délky by mělo vycházet za zásad stavební mechaniky uvažující okrajové podmínky (uložení prvku);
- i je poloměr setrvačnosti k příslušné ose, stanovený na základě průřezových veličin.

Tabulka 6.1 Hodnoty α a $\bar{\lambda}_0$ pro rovinný vzpěr

Typ prutu	Osa vybočení	Austenitické a austeniticko-feritické oceli		Feritické oceli	
		α	$\bar{\lambda}_0$	α	$\bar{\lambda}_0$
Za studena tvářené úhelníky a U průřezy	Obě	0,76	0,2	0,76	0,2
Za studena tvářené C průřezy	Obě	0,49	0,2	0,49	0,2
Za studena tvářené HTR	Obě	0,49	0,3	0,49	0,2
Za studena tvářené TR/ETR	Obě	0,49	0,2	0,49	0,2
Za tepla tvářené HTR	Obě	0,49	0,2	0,34	0,2
Za tepla tvářené TR/ETR	Obě	0,49	0,2	0,34	0,2
Svařované nebo za tepla válcované průřezy	Hlavní	0,49	0,2	0,49	0,2
	Vedlejší	0,76	0,2	0,76	0,2

Obrázek 6.1 zobrazuje křivky vzpěrné pevnosti.



Obrázek 6.1 Křivky vzpěrné pevnosti

Vliv vzpěru může být ignorován a posudek bude následně proveden pouze na základě únosnosti průřezu, pokud je splněna jedna z následujících podmínek:

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

Křivky vzpěrné pevnosti na obrázku 6.1 a dle tabulky 6.1 vykazují konzervativnější výsledky než ty v EN 1993-1-4 (hodnoty α a $\bar{\lambda}_0$ jsou uvedeny v tabulce 6.2). To je odůvodněno experimentálním výzkumem za posledních 10 let, který ukázal, že křivky vzpěrné pevnosti dle EN 1993-1-4 pro za studena tvářené otevřené a uzavřené průřezy jsou příliš optimistické a že také existují rozdíly v chování sloupů namáhaných vzpěrem z feritických ocelí ve srovnání s austenitickými a austeniticko-feritickými oceli. Předpokládá se, že v příštím vydání EN 1993-1-4 budou křivky vzpěrné pevnosti z obrázku 6.1 a tabulky 6.1.

Tabulka 6.2 Hodnoty α a $\bar{\lambda}_0$ pro rovinný vzpěr, vzpěr zkroucením a prostorový vzpěr dle EN 1993-1-4

Způsob vybočení	Typ prvku	α	$\bar{\lambda}_0$
Rovinný vzpěr	Otevřené průřezy tvarované za studena	0,49	0,40
	Uzavřené průřezy (svařované a bezešvé)	0,49	0,40
	Otevřené svařované průřezy (vybočení okolo hlavní osy)	0,49	0,20
	Otevřené svařované průřezy (vybočení okolo vedlejší osy)	0,76	0,20
Hodnoty α a $\bar{\lambda}_0$ neplatí pro uzavřené průřezy, které jsou dodatečně žíhány po výrobě (což jsou ojedinělé případy).			

6.3.4 Vzpěr zkroucením a prostorový vzpěr

Návrhová únosnost prvků zatížených vzpěrem zkroucením a prostorovým vzpěrem by měla být stanovena dle části 6.3.3, ale s tím že $\bar{\lambda}$ bude nahrazeno $\bar{\lambda}_T$, jak je uvedeno v rovnicích (6.8) a (6.9), přičemž $\alpha = 0,34$ a $\bar{\lambda}_0 = 0,2$.

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{pro průřezy třídy 1, 2 a 3} \quad (6.8)$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{cr}}} \quad \text{pro průřezy třídy 4} \quad (6.9)$$

ve kterých:

$$N_{cr} = N_{cr,TF} \text{ a } N_{cr} < N_{cr,T}$$

kde:

$N_{cr,T}$ je pružná kritická vzpěrná síla při vybočení zkroucením, která je dána vztahem:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l_T^2} \right) \quad (6.10)$$

$N_{cr,TF}$ je pružná kritická síla pro vybočení při prostorovém vzpěru. Pro průřezy symetrické k ose $y-y$ (tj. $z_0 = 0$):

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right] \quad (6.11)$$

kde:

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \quad (6.12)$$

i_y a i_z jsou poloměry setrvačnosti plného průřezu kolem osy y , respektive z ;

y_0 a z_0 jsou souřadnice středu smyku vztahené k těžišti plného průřezu;

G je smykový modul pružnosti;

l_T je vzpěrná délka vyšetřovaného prvku na vzpěr zkroucením (viz EN 1993-1-3);

I_T je moment setrvačnosti plného průřezu ve volném kroucení;

I_w je výsečový moment setrvačnosti plného průřezu;

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2;$$

$N_{cr,y}$ a $N_{cr,z}$ jsou pružné kritické síly pro vybočení k ose $y-y$, respektive $z-z$.

U dvojose symetrických průřezů se střed smyku shoduje s těžištěm průřezu, tudíž $y_0 = 0$ a $z_0 = 0$ a

$$N_{cr,TF} = N_{cr,T} \text{ pokud } N_{cr,T} < N_{cr,y} \text{ a } N_{cr,T} < N_{cr,z}$$

V případě úhelníků by výše zmíněné osy y a z měly být nahrazeny osami u a v .

6.4 Ohyb

6.4.1 Obecné informace

Prvek je namáhán prostým ohybem, pokud zatížení působí kolmo na podélnou osu prvku a pokud je prvek podepřen tak, že nedochází ke zkroucení ani ke vzniku tlakových nebo tahových namáhání na jeho koncích.

Při stanovení ohybové únosnosti by měla být posouzena následující kritéria:

- Únosnost průřezu (viz část 5.7);
- Boulení stěn (pouze průřezy 4. třídy, viz část 5.7);
- Klopení (viz část 6.4.2);
- Boulení ve smyku (viz část 6.4.3);
- Lokální namáhání v místě zatížení nebo podpory (viz část 6.4.4).

Při navrhování ohýbaných prvků je nutné zohlednit vliv smykového ochabnutí a zvlnění pásnice, viz části 5.4.2 a 5.4.3.

Návrh prvku namáhaného dvojosým ohybem by měl být proveden dle části 6.5.2.

6.4.2 Klopení

Prvky namáhané ohybem okolo hlavní osy průřezu, které nejsou podélně podepřeny v příčném směru, by měly být posouzeny na klopení. Vliv klopení může být zanedbán a posudek proveden pouze výpočtem únosnosti průřezu, pokud:

- Prut je namáhán ohybem okolo vedlejší osy;
- Tlačená pásnice prutu je dostatečně podepřena v příčném směru po celé své délce;
- Pruty s poměrnou štíhlostí při klopení
 $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$ 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:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1} \quad (6.13)$$

kde:

$$W_y = W_{pl,y} \text{ pro průřezy třídy 1 nebo 2;}$$

$$W_y = W_{el,y} \text{ pro průřezy třídy 3;}$$

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

χ_{LT} je součinitel klopení daný vztahem:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (6.14)$$

ve kterém:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \quad (6.15)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (6.16)$$

α_{LT} je součinitel imperfekce při klopení
 = 0,34 pro za studena tvarované a uzavřené průřezy (svařované a bezešvé);
 = 0,76 pro svařované otevřené průřezy a jiné průřezy, pro které nejsou dostupná žádná zkušební data;

M_{cr} je pružný kritický moment při klopení (viz příloha E).

V případě úhelníků by výše zmíněné osy y a z měly být nahrazeny osami u a v .

Obrázek 6.2 zobrazuje hodnoty χ_{LT} v závislosti na $\bar{\lambda}_{LT}$.

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

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \text{ale } \chi_{LT,mod} \leq 1,0 \quad \text{a} \quad \chi_{LT,mod} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \quad (6.17)$$

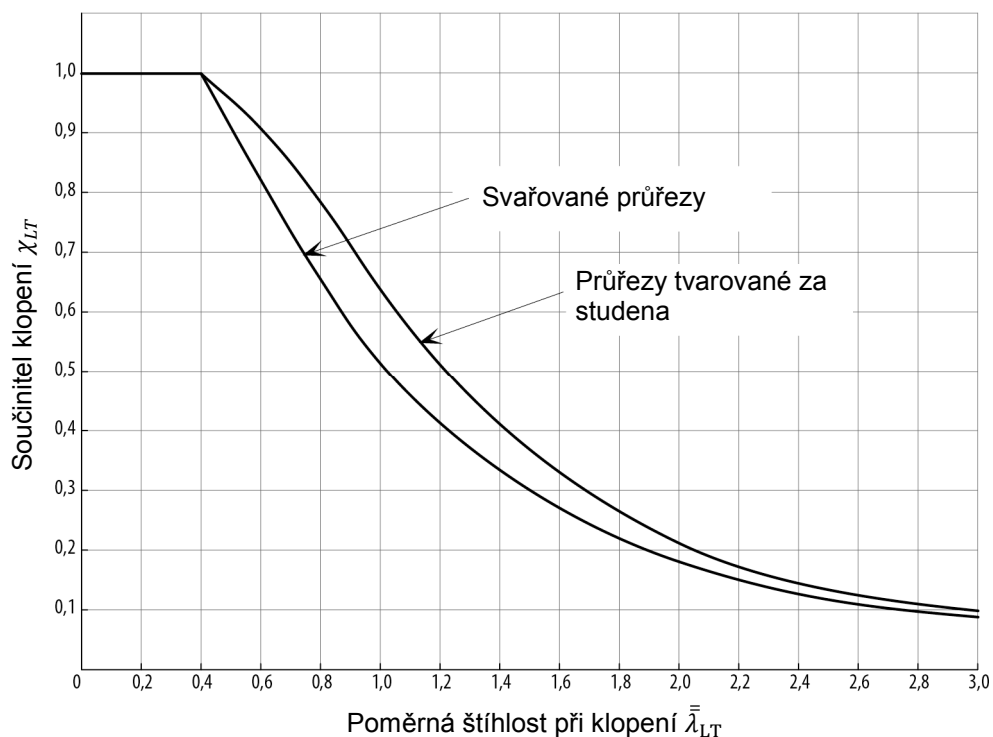
minimální hodnota f je doporučena jako:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c)[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \quad \text{but } f \leq 1,0 \quad (6.18)$$

a

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}} \quad (6.19)$$

Hodnoty C_1 jsou uvedeny v příloze E.



Obrázek 6.2 Křivky klopení

6.4.3 Smyk

Návrhová únosnost ve smyku se má určit jako menší z hodnot smykové únosnosti při boulení a plastické smykové únosnosti (viz část 5.7.5).

Smykové boulení je nutné posoudit pokud:

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{56,2\varepsilon}{\eta} \quad \text{v případě nevyztužených stojin} \quad (6.20)$$

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{24,3\varepsilon \sqrt{k_\tau}}{\eta} \quad \text{v případě vyztužených stojin} \quad (6.21)$$

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

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (6.22)$$

kde příspěvek stojiny činí:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (6.23)$$

kde:

h_w je čistá výška stojiny mezi pásnicemi (obrázek 6.3);

ε je součinitel stanoven dle tabulky 5.2;

k_τ je součinitel smykového boulení;

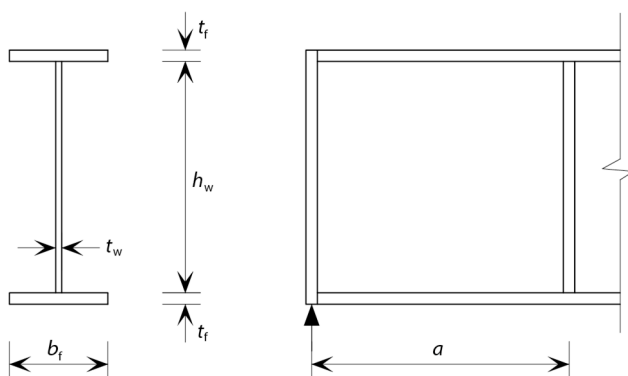
$V_{bw,Rd}$ je příspěvek stojiny k únosnosti;

$V_{bf,Rd}$ je příspěvek pásnice k únosnosti;

f_{yw} je charakteristická hodnota meze kluzu stojiny;

η viz EN 1993-1-5 (EN 1993-1-4 doporučuje $\eta = 1,20$; dle národní přílohy ČR platí $\eta = 1,20$).

Poznámka: Ve výpočtu plastické smykové únosnosti by měla být použita stejná hodnota η jaká byla použita pro výpočet smykové únosnosti při boulení.



Obrázek 6.3 Značení geometrických rozměrů

Pro stojiny s příčnými výztuhami pouze nad podporami i pro stojiny s mezilehlými příčnými nebo podélnými výztuhami, popř. s obojím, se má součinitel příspěvku stojiny k únosnosti v boulení při smyku χ_w získat z tabulky 6.3.

Tabulka 6.3 Součinitel příspěvku stojiny χ_w k únosnosti boulení při smyku

	Tuhá koncová výztuha	Netuhá koncová výztuha
$\bar{\lambda}_w \leq \frac{0,65}{\eta}$	η	η
$\frac{0,65}{\eta} < \bar{\lambda}_w < 0,65$	$\frac{0,65}{\bar{\lambda}_w}$	$\frac{0,65}{\bar{\lambda}_w}$
$\bar{\lambda}_w \geq 0,65$	$\frac{1,56}{(0,91 + \bar{\lambda}_w)}$	$\frac{1,19}{(0,54 + \bar{\lambda}_w)}$

Příčné výztuhy jsou pouze nad podporami:

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \right) \quad (6.24)$$

Příčné výztuhy jsou nad podporami spolu s mezilehlými příčnými, nebo podélnými, popř. obojími výztuhami:

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right) \quad (6.25)$$

kde k_τ je nejmenší součinitel kritického napětí stojiny. Pro stojiny s tuhými příčnými výztuhami a bez podélných výztuh nebo s více dvěma podélnými výztuhami lze součinitel kritického napětí k_τ získat následovně:

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00(h_w/a)^2 + k_{\tau\text{st}} \quad \text{pokud } a/h_w \geq 1 \quad (6.26)$$

$$k_{\tau} = 4,00 + 5,34(h_w/a)^2 + k_{\tau\text{st}} \quad \text{pokud } a/h_w < 1 \quad (6.27)$$

kde:

$$k_{\tau\text{st}} = 9(h_w/a)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 h_w}\right)^3} \quad \text{ale ne méně než} \quad \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}} \quad (6.28)$$

kde:

a je vzdálenost mezi příčnými výztuhami, viz obrázek 6.3;

I_{sl} je moment setrvačnosti podélné výztuhy k ose z-z.

Rovnice (6.26) a (6.27) platí také pro pruty s jednou nebo dvěma podélnými výztuhami, pokud platí poměr $a/h_w \geq 3$. Pro případ prutů s jednou nebo dvěma podélnými výztuhami a s poměrem $a/h_w < 3$ je třeba uvést odkaz na přílohu A3 normy EN 1993-1-5.

Zjednodušeně se může příspěvek pásnic χ_f zanedbat. Pokud únosnost pásnic není pro ohybový moment plně využita ($M_{Ed} < M_{f,Rd}$), má se příspěvek pásnic stanovit následovně:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] \quad (6.29)$$

kde:

b_f a t_f se berou pro pásnici, která vykazuje menší osovou tuhost a b_f se nebere větší než $15\epsilon t_f$ na každé straně stojiny;

$M_{f,Rd}$ je moment únosnosti průřezu sestávajícího z účinné plochy pásnic ($M_{f,Rd} = M_{f,k}/\gamma_{M0}$);

$$c = a \left(0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right) \quad \text{a} \quad \frac{c}{a} \leq 0,65 \quad (6.30)$$

f_{yf} je charakteristická hodnota meze kluzu pásnice.

Při výskytu osové síly N_{Ed} se má hodnota $M_{f,Rd}$ redukovat vynásobením následujícím součinitelem:

$$\left[1 - \frac{N_{Ed}}{(A_{f1} + A_{f2}) f_{yf}} \frac{1}{\gamma_{M0}} \right] \quad (6.31)$$

kde A_{f1} a A_{f2} jsou plochy horní a dolní pásnice.

Posouzení se má provést následovně:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.32)$$

kde: V_{Ed} je návrhová smyková síla včetně smyku od kroucení.

Posouzení prutů namáhaných tlakem a dvojosým ohybem se má provést následovně:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{f_y W_{y,eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{f_y W_{z,eff} / \gamma_{M0}} \leq 1,0 \quad (6.33)$$

kde:

A_{eff} je účinná plocha průřezu (část 5.4.1);

$e_{y,N}$ je excentricita k neutrální ose ve směru osy y (část 5.4.1);

$e_{z,N}$ je excentricita k neutrální ose ve směru osy z (část 5.4.1);

$M_{y,Ed}$ je návrhový ohybový moment kolem osy y ;

$M_{z,Ed}$ je návrhový ohybový moment kolem osy z ;

N_{Ed} je návrhová tlaková síla;

$W_{y,eff}$ je účinný modul průřezu k ose y (část 5.4.1);

$W_{z,eff}$ je účinný modul průřezu k ose z (část 5.4.1).

Účinky zatížení M_{Ed} a N_{Ed} se mají stanovit se zahrnutím přídatných vlivů druhého řádu. Posouzení prvku na boulení se má provést pro napětí stanovené ve vzdálenosti menší z $0,4a$; $0,5b$ od konce panelu, kde jsou napětí větší. Přitom je nutné zkontrolovat únosnost plného průřezu na konci prvku.

Pokud $\bar{\eta}_3$ (viz dále) nepřesáhne 0,5, není nutné návrhovou únosnost pro ohybový moment a osovou sílu redukovat s ohledem na smykovou sílu. Jestliže je $\bar{\eta}_3$ větší než 0,5, má kombinovaný účinek momentu a smyku ve stojině prutu o průřezu I nebo komorového průřezu, splňovat podmínku:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{pokud} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (6.34)$$

kde:

$M_{f,Rd}$ je návrhový plastický moment únosnosti průřezu složeného z účinných ploch pásnic;

$M_{pl,Rd}$ je návrhová plastická únosnost průřezu složeného z účinné plochy pásnic a plně účinné stojiny bez ohledu na její třídu.

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \quad (6.35)$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \quad (6.36)$$

Napětí jsou uvažována jako kladná. M_{Ed} a V_{Ed} mají zahrnovat příslušné globální účinky druhého řádu.

Kritérium dle rovnice (6.34) je nutné posoudit v každém průřezu s výjimkou průřezů bližších než $h_w/2$ od podpory se svislou výtuhou.

Při výskytu osové síly N_{Ed} je třeba, dle části 6.2.9 normy EN 1993-1-1, $M_{pl,Rd}$ nahradit $M_{N,Rd}$ a $M_{f,Rd}$ redukovat dle rovnice (6.31). V případě že tlaková síla je tak velká, že je celá stěna tlačena, je nutné využít postupů normy EN 1993-1-5.

6.4.4 Borcení a boulení stojiny

Pokud je tlačena pásnice v příčném směru patřičně držena, tak při stanovení únosnosti nevyztužené stojiny, vůči silám koncentrovaného zatížení nebo reakcím v podpoře, bude rozhodovat jeden ze tří možných způsobů porušení:

- Porušení stojiny v blízkosti pásnice, doprovázené plastickou deformací pásnice;
- Borcení stojiny formou lokálního boulení a porušení stojiny v blízkosti pásnice, doprovázené plastickou deformací pásnice;
- Boulení stojiny po převážné délce prutu.

U za studena tvářených průřezů je možné využít pokynů uvedených v normě EN 1993-1-3 pro uhlíkovou ocel.

Pro válcované a svařované pruty je nutné použít následující postup založený na pokynech normy EN 1993-1-5.

Pro nevyztužené nebo vyztužené stojiny při zatížení příčnými silami se návrhová únosnost v lokálním boulení má stanovit takto:

$$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1} \quad (6.37)$$

kde:

t_w je tloušťka stojiny;

f_{yw} je mez kluzu stojiny;

L_{eff} je účinná délka pro únosnost na příčné síly, která se má určit ze vztahu $L_{eff} = \chi_F l_y$.

ve kterém:

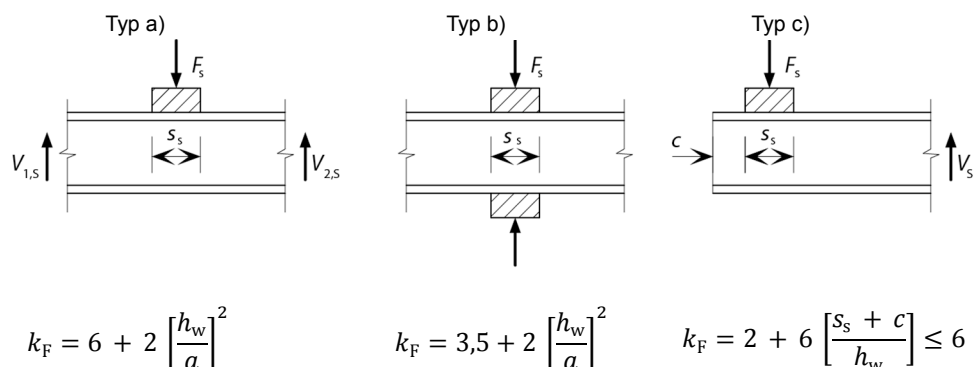
l_y je účinná zatížená délka vzhledem k příslušné roznášecí délce s_s ;

χ_F je součinitel lokálního boulení.

Kromě toho by měl být uvažován vliv příčné síly na ohybovou únosnost prvku.

Při stanovení L_{eff} se rozlišují tři typy způsobů působení zatěžovací síly. Zatížení se přenáší následovně:

- Přes pásnici a je přenášeno smykovými silami ve stojině, viz obrázek 6.4a;
- Přes jednu pásnici a je přenášeno přes stojinu přímo do druhé pásnice, viz obrázek 6.4b;
- Přes jednu pásnici blízko u nevyztuženého konce, viz obrázek 6.4c.

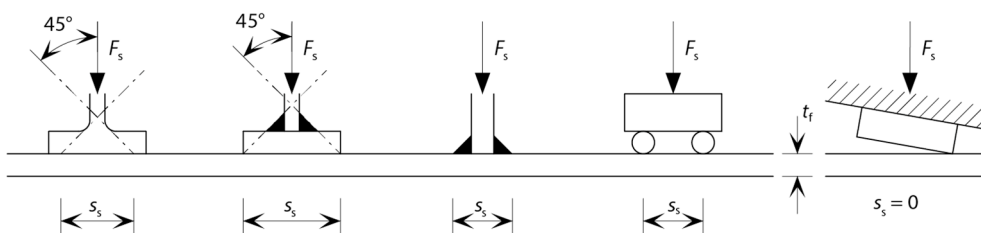


Obrázek 6.4 Součinitel boulení pro různé typy zavedení zatížení

Roznášecí délka

Roznášecí délka na pásnici s_s se má stanovit jako délka, na kterou se působící síla účinně roznese ve sklonu 1:1, viz obrázek 6.5. Hodnota s_s ale nemá být větší než h_w .

Pokud je několik soustředěných sil blízko sebe má se posoudit únosnost jak pro každou jednotlivou sílu, tak i pro celkové zatížení s délkou s_s uvažovanou jako vzdálenost středů krajních sil.



Obrázek 6.5 Roznášecí délka

Účinná zatížená délka

Účinná zatížená délka l_y se má vypočítat následovně:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad (6.38)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{pokud } \bar{\lambda}_F > 0,5 \quad (6.39)$$

$$m_2 = 0 \quad \text{pokud } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \quad (6.40)$$

U případů a) a b) podle obrázku 6.4 se má l_y získat ze vztahu:

$$l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \quad (6.41)$$

ale $l_y \leq$ vzdálenost mezi sousedními výztuhami.

Pro případ c) se má l_y získat jako nejmenší hodnota z rovnic (6.42) a (6.43). V rovnici (6.44) může být s_s uvažováno jako nula, pokud prvek zavádějící zatížení není rovnoběžný se zatěžovaným prutem, viz obrázek 6.5.

$$l_y = l_e + t_f \left[\sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f}\right)^2 + m_2} \right] \quad (6.42)$$

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (6.43)$$

kde l_e je dáno jako:

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad (6.44)$$

Účinná délka pro únosnost na příčné síly

Účinná délka pro únosnost na příčné síly se má určit ze vztahu:

$$L_{\text{eff}} = \chi_F l_y \quad (6.45)$$

ve kterém:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1.0 \quad (6.46)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{\text{cr}}}} \quad (6.47)$$

$$F_{\text{cr}} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (6.48)$$

kde:

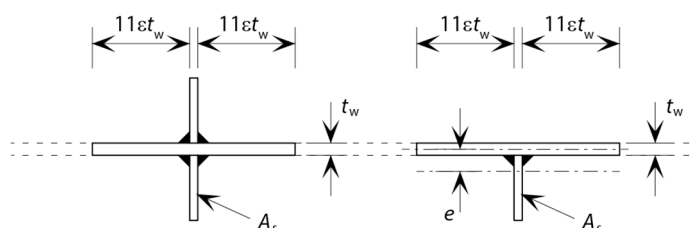
k_F je součinitel boulení pro různé typy zavedení zatížení (obrázek 6.4).

Pro výpočet m_2 je potřeba znát hodnotu $\bar{\lambda}_F$, tudíž po získání $\bar{\lambda}_F$ je nutné m_2 přepočítat.

6.4.5 Příčné výztuhy

Příčné výztuhy se obvykle umísťují do míst podpor a lokálních zatížení, a to ideálně oboustranně a středově symetricky vůči těžišti průřezu. Výztuhy se musí posoudit na porušení průřezu a vzpěr. Mezilehlé výztuhy, které nejsou namáhány vnějším zatížením, je nutné posoudit pouze na boulení.

Při posouzení únosnosti ve vzpěru lze průřez výztuhy brát jako plnou plochu zahrnující výztuhy a šířku stěny, ale ne víc než skutečné rozměry a s vyloučením jakéhokoliv překrytí částí zahrnutých do sousedních výztuh, viz obrázek 6.6.



Obrázek 6.6 Účinný průřez výztuhy

Vzpěrná únosnost výztuhy $N_{b,Rd}$ se stanoví podle části 6.3.3 s uvažováním $\alpha = 0,49$ a $\bar{\lambda}_0 = 0,2$. Vzpěrná délka výztuhy l musí být vhodně zvolená s ohledem na její připojení (podepření), ale nesmí být menší než $0,75h_w$, kdy jsou oba její konce příčně drženy. Větší hodnota l přísluší směru s měkčím podepřením výztuhy. Rovněž je nutné posoudit křížový průřez na vzpěr zkroucením.

Při použití jednostranných nebo jiných nesymetrických výztuh se má výsledná excentricita stanovit podle části 6.5.2.

V místech podpor nebo mezilehlých polohách, kde působí lokální zatížení, musí být vzpěrná únosnost vyšší, než velikost reakcí nebo zatížení. Ostatní mezilehlé výztuhy lze navrhnout na osovou sílu:

$$N_{Ed} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} \frac{f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (6.49)$$

kde:

V_{Ed} je návrhová smyková síla v prutu.

Při použití výše uvedeného výrazu se neuvažuje vliv výztuhy.

Moment setrvačnosti mezilehlé výztuhy I_{st} musí splňovat:

$$\frac{a}{h_w} < \sqrt{2}, \quad I_{st} \geq \frac{1,5 h_w^3 t^3}{a^2} \quad (6.50)$$

$$\frac{a}{h_w} \geq \sqrt{2}, \quad I_{st} \geq 0,75 h_w t^3 \quad (6.51)$$

6.4.6 Průhyb

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

Průhyby pružných prutů (tj. těch, které neobsahují plastické klouby) mohou být stanoveny standardním postupem, ale s tím rozdílem že modulu 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:

$$E_S = \frac{(E_{S1} + E_{S2})}{2} \quad (6.52)$$

kde:

$E_{S,1}$ je sečnový modul pro napětí σ_1 v tažené pásnici;

$E_{S,2}$ je sečnový modul pro napětí σ_2 v tlačené pásnici.

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:

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left(\frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad \text{kde } i = 1,2 \quad (6.53)$$

kde:

$\sigma_{i,Ed,ser}$ je návrhové napětí pro mezní stav použitelnosti;

E je modul pružnosti = 200×10^3 N/mm²;

n je součinitel.

Součinitel n je odvozen na základě napětí na mezi úměrnosti křivky pracovního diagramu a udává míru jejího zakřivení (nelinearity), přičemž jeho nižší hodnoty vykazují vyšší míru zakřivení (vyšší nelinearitu). Hodnoty součinitele n obecně závisí na třídě korozivzdorné oceli, způsobu zpracování/výroby, úrovni tváření za studena a směru působení zatížení (tah nebo tlak), tudíž existuje velké množství hodnot tohoto součinitele. Doporučené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.4.

Tabulka 6.4 Hodnoty součinitele n pro stanovení sečnového modulu pružnosti

Typ oceli	Součinitel n
Feritická	14
Austenitická	7
Austeniticko-feritická	8

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) budou v příštím vydání normy EN 1993-1-4 nahrazeny hodnotami z tabulky 6.4.

Tabulka 6.5 Hodnoty součinitele n pro stanovení sečnového modulu pružnosti dle EN 1993-1-4

Typ oceli	Třída	Součinitel n	
		Podélný směr	Příčný směr
Feritická	1.4003	7	11
	1.4016	6	14
	1.4512	9	16
Austenitická	1.4301, 1.4306, 1.4307, 1.4318, 1.4541	6	8
	1.4401, 1.4404, 1.4432, 1.4435, 1.4539, 1.4571,	7	9
Austeniticko-feritická	1.4462, 1.4362	5	5

Poznámka: pokud orientace prutu není známa nebo nemůže být zjištěna, je konzervativní použití hodnot pro podélný směr.

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 σ_1 a σ_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 nutné využít jiný, vhodnější postup (například metodu integrací po délce prutu).

V případě průřezů 4. třídy a/nebo prvků náchylných na smykové ochabnutí je nutné ve výpočtu uvažovat pouze účinný průřez. Jako první odhad je vhodné použít účinný průřez stanovený na základě účinných ploch podle části 5.4.1 a/nebo 5.4.2. Pro zpřesnění je možné použít účinný průřez, získaný pomocí účinných ploch s uvažováním boulení, stanoveného pro příslušné napětí v částech průřezu s použitím ε v části 5.4.1 (ale ne v části 5.4.2) vypočteném jako:

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{\sigma} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} \quad (6.54)$$

kde:

σ je skutečné napětí v účinném průřezu.

6.5 Kombinace osově síly a ohybu

6.5.1 Osový tah a ohyb

Pruty namáhané tahem a ohybem je nutné posoudit na klopení dle části 6.4.2 s uvažováním osamoceného ohybového momentu. Únosnost je nutné posoudit také při kombinaci zatížení, tedy při uvažování tahové síly a maximální hodnoty ohybového momentu. Posouzení únosnosti je provedeno následovně:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (6.55)$$

kde:

N_{Ed} je návrhová hodnota tahové síly v kritickém místě;

N_{Rd} je návrhová únosnost prvku v tahu;

$M_{y,Ed}$ je návrhový ohybový moment okolo hlavní osy v kritickém místě;

$M_{z,Ed}$ je návrhový ohybový moment okolo vedlejší osy v kritickém místě;

$M_{y,Rd}$ je návrhový moment únosnosti okolo hlavní osy bez uvažování osově síly, ale s případným uvažováním vlivu smyku (část 5.7.4);

$M_{z,Rd}$ je návrhový moment únosnosti okolo vedlejší osy bez uvažování osově síly, ale s případným uvažováním vlivu smyku (část 5.7.4).

6.5.2 Osový tlak a ohyb

Krom splnění požadavků na únosnost průřezu (viz část 5.7.6) v každém bodě po délce prutu a na únosnost ohýbaného prutu (viz část 6.4), je nutné posoudit účinky interakce tlakové síly a ohybového momentu.

Osový tlak a rovinný ohyb okolo hlavní osy:

Zabránit vybočení okolo hlavní osy:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.56)$$

Zabránit vybočení okolo vedlejší osy (pro pruty náchylné na klopení):

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min1}} + k_{LT} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) \leq 1 \quad (6.57)$$

Osový tlak a rovinný ohyb okolo vedlejší osy:

Zabránit vybočení okolo vedlejší osy:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.58)$$

Osový tlak a šikmý ohyb:

Všechny pruty mají splňovat podmínku:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.59)$$

Pruty náchylné na klopení mají zároveň splňovat podmínku:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min1}} + k_{LT} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.60)$$

kde v těchto výrazech:

e_{Ny} a e_{Nz} jsou posuny těžišťové osy rovnoměrně tlačенého průřezu;

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ a $M_{z,Ed}$ jsou návrhové hodnoty tlakové síly a největších momentů k osám y - y a z - z , působících na prutu;

$(N_{b,Rd})_{min}$ je nejmenší hodnota $N_{b,Rd}$ pro následující způsoby vybočení: rovinný vzpěr okolo osy y , rovinný vzpěr okolo osy z , vzpěr zkroucením a prostorový vzpěr (viz části 6.3.3. a 6.3.4);

$(N_{b,Rd})_{min1}$ je nejmenší hodnota $N_{b,Rd}$ pro následující způsoby vybočení: rovinný vzpěr okolo osy z , vzpěr zkroucením a prostorový vzpěr (viz části 6.3.3. a 6.3.4);

$\beta_{W,y}$ a $\beta_{W,z}$ hodnoty β_W určené pro osy y nebo z ve kterých:

$$\begin{aligned} \beta_W &= 1 \text{ pro průřezy třídy 1 a 2} \\ &= W_{el}/W_{pl} \text{ pro průřezy třídy 3} \\ &= W_{eff}/W_{pl} \text{ pro průřezy třídy 4;} \end{aligned}$$

$W_{pl,y}$ a $W_{pl,z}$ jsou plastické moduly průřezu k osám y nebo z ;

$M_{b,Rd}$ je moment únosnosti prutu na klopení (viz část 6.4.2).

Součinitele interakce k_y , k_z a k_{LT} pro otevřené průřezy se mají stanovit jako:

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad \text{ale} \quad 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad (6.61)$$

$$k_z = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_z - 0,5) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad \text{ale} \quad 1,2 \leq k_z \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad (6.62)$$

$$k_{LT} = 1,0$$

Součinitele interakce k_y a k_z pro čtyřhranné a kruhové uzavřené průřezy se mají stanovit jako:

$$k_y = 1 + D_1 (\bar{\lambda}_y - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \leq 1 + D_1 (D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad (6.63)$$

$$k_z = 1 + D_1 (\bar{\lambda}_z - D_2) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd,y})_{\min 1}} \leq 1 + D_1 (D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd,y})_{\min 1}} \quad (6.64)$$

Kde hodnoty součinitelů D_1 , D_2 a D_3 udává tabulka 6.6.

Tabulka 6.6 Hodnoty součinitelů D_1 , D_2 a D_3

Průřez	Typ oceli	D_1	D_2	D_3
Čtyřhranný uzavřený průřez (HTR)	Feritická	1,3	0,45	1,6
	Austenitická	2,0	0,30	1,3
	Austeniticko-feritická	1,5	0,40	1,4
Kruhová trubka (TR)	Feritická	1,9	0,35	1,3
	Austenitická	2,5	0,30	1,3
	Austeniticko-feritická	2,0	0,38	1,3

Norma EN 1993-1-4:2015 v současnosti poskytuje pouze rovnice (6.61) a (6.62). Ty jsou ale pro uzavřené průřezy vysoce konzervativní, očekává se tedy, že v příštím vydání normy EN 1993-1-4 budou zahrnuty také rovnice (6.63) a (6.64).

Národní přílohy mohou poskytovat jiné postupy pro posouzení interakce. Národní příloha ČR neposkytuje žádné alternativy.

V případě úhelníků by výše zmíněné osy y a z měly být nahrazeny osami u a v .

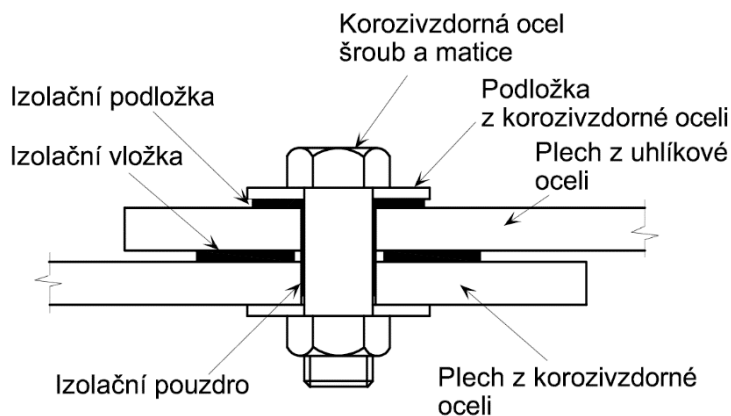
7 NAVRHOVÁNÍ SPOJŮ

7.1 Obecná doporučení

7.1.1 Trvanlivost

Pro dosažení optimální korozní odolnosti je potřebné věnovat mimořádnou pozornost návrhu spojů. To platí především pro spoje, které mohou navlhnout vlivem počasí, postřikem, ponorem, kondenzací nebo z jiných příčin. Má se uvážit umístění spoje mimo zdroje vlhkosti a tím vyloučit nebo omezit s tím související korozní problémy. Alternativně je možné odstranit zdroj vlhkosti, například při kondenzaci lze zajistit potřebnou ventilaci nebo zajistit, aby se teplota v okolí konstrukce trvale držela nad teplotou rosného bodu.

Jestliže není v praxi možné vyloučit zvlhnutí spojů uhlíkové a korozivzdorné oceli, má se zajistit prevence bimetalické koroze, viz část 3.2.3. Použití šroubů z uhlíkové oceli se má u prvků z korozivzdorných ocelí vždy vyloučit. U šroubových spojů, které mohou být náchylné k nepříjemnému stupni koroze, se mají učinit takové opatření, aby se uhlíková ocel elektricky izolovala od prvku z korozivzdorné oceli. To obecně znamená použití nekovové izolační podložky a podle možnosti i pouzdra; příklad typického detailu je na obrázku 7.1. Izolační podložky a pouzdra by měly být vyrobeny z termosetového polymeru, jako je neopren (syntetický kaučuk), který je dostatečně robustní, aby zamezil vzájemnému kontaktu uhlíkové a korozivzdorné oceli i v dalším období. Utěsnění spoje zamezuje vniknutí vlhkosti a zabránění vzniku štěrbinové koroze. Aby nedošlo k vytvoření štěrbin, neměla by izolační podložka přesahovat podložku z korozivzdorné oceli. V atmosférických podmínkách obsahujících chloridy se štěrbinové korozi lze také bránit vložením izolační pružné podložky přímo na hlavu šroubu nebo pokrytím plochy spoje silikonovým těsněním.



Obrázek 7.1 *Zabránění bimetalické korozi ve spoji nestejných materiálů*

Pro korozně ohrožené svarové spoje uhlíkových a korozivzdorných ocelí se všeobecně doporučuje, aby každý nátěr použitý pro uhlíkovou ocel také překrýval svar i určitou oblast korozivzdorné oceli, konkrétně 75 mm od svaru, jestliže spoj může být ohrožen korozi.

Aby se zabránilo štěrbinové korozi ve šroubových spojích, má se věnovat pozornost výběru materiálů vhodných pro dané prostředí (viz část 3.2.2).

7.1.2 Předpoklady návrhu

Styčníky musí být navrženy na základě realistického předpokladu o rozdělení vnitřních sil, které má odpovídat poměrným tuhostem uvnitř styčníku. Vnitřní síly musí být v rovnováze se silami působícími na styčník. Každá část podílející se na přenosu při uvažovaném rozdělení vnitřních sil musí být schopna přenosu zatížení předpokládaného v analýze a dosahovat deformační kapacitou prvku odpovídající stanovené deformaci.

7.1.3 Styčníky a příložky

Pruty sbíhající se ve styčnicích by měly být uspořádány tak, aby se jejich těžišťové osy protínaly v jednom bodě. V případě, že ve styčníku budou osy excentricky, je nutné spoj navrhnout tak, aby odolal i vzniklým momentům. V případě styčniců tvořených úhelníky nebo T průřezy a dvojicí šroubů v každém prutu, mohou osy spojnice těchto dvou šroubů posloužit pro určení průsečíku místo těžišťových os prutů.

Příložkový spoj nosníků je vhodné situovat co nejbližší k inflexním bodům (nulový ohybový moment). U příložkového spoje sloupů je nutné uvažovat momenty způsobené P- δ efektem.

7.1.4 Další obecné informace

Pokud je spoj vystaven vibracím, nárazovému zatížení nebo opačnému zatížení, preferuje se provedení pomocí svaru. Takovéto spoje je ale nutné posoudit na únavu (viz kapitola 9).

Během navrhování veškerých styčniců a spojů by měl být brán ohled na snadnou výrobu a montáž. Pozornost by měla být věnována:

- Použití standardizovaných detailů;
- Tolerancím potřebných pro bezpečnou montáž;
- Vůlím potřebným pro utažení šroubů;
- Potřebného přístupu pro svařování;
- Požadavkům svařovacích postupů;
- Vlivu úhlových a délkových tolerancí pro sestavení.

Ovlivnění geometrie vlivem deformací po svařování bude v případě austenitických ocelí výraznější, než v případě uhlíkové oceli (viz část 11.6.4). Pozornost je také nutné věnovat požadavkům na následnou kontrolu a údržbu.

7.2 Šroubové spoje

7.2.1 Obecné informace

Doporučení uvedená v této části platí pro šroubové spoje s otvory s příslušnou vůlí v otvorech, přenášející zatížení smykem, tahem nebo kombinací smyku a tahu. Pravidla platí pro šroubové spoje tříd pevnosti 50, 70 a 80. Únosnost šroubových spojů třídy pevnosti 100 je nutné potvrdit provedením zkoušky. Z praktických zkušeností je vhodné opatřit spoj podložkou jak pod hlavou šroubu, tak pod maticí. Informace o materiálech příslušných šroubů a matic jsou uvedeny v částech 2.3 a 11.7.

Smykové síly jsou přenášeny nosnou plochou mezi šrouby a spojenými prvky. Pro spoje, u kterých je smyková síla přenášena třením, nejsou uvedena žádná doporučení, pouze informace v části 7.2.2.

Za únosnost spoje se považuje menší z hodnot únosnosti spojovaných prvků (viz část 7.2.3) a únosnosti spojovacích prvků (viz část 7.2.4).

Pro omezení nevratné deformace šroubových spojů je nutné limitovat napětí ve šroubech a oslabených plochách v místech otvorů pro šrouby hodnotou meze kluzu.

7.2.2 Předepnuté šrouby

V minulosti se vyskytovaly obavy ohledně použití předepnutých šroubů z korozivzdorné oceli pro spoje, a to z důvodu nedostatku znalostí o:

- Vhodném způsobu předepnutí, zejména zabránění zadření závitů;
- Vlivu časově závislé relaxace napětí korozivzdorné oceli na chování předepnutých spojů;
- Součiniteli tření povrchu styčných třecích ploch z korozivzdorné oceli.

Probíhající výzkum v rámci projektu EU RFCS SIROCO zkoumá chování předepnutých spojů z korozivzdorné oceli a poskytuje důležité údaje, které vyvracejí toto vnímání. Rozsáhlý program zkoušek sestav z korozivzdorné oceli ukazuje že:

- Šrouby z austenitických a austeniticko-feritických ocelí mohou být předepnuty za předpokladu, že je zvolena správná pevnostní třída šroubu, způsob utahování a mazivo;
- Pokles předpínací síly, ke kterému dochází u spojů z korozivzdorných ocelí, je srovnatelný se ztrátou předpínací síly u spojů z uhlíkové oceli;
- Součinitele tření naměřené na pískovaném povrchu korozivzdorné oceli byly minimálně ekvivalentní k třídě B ($\mu = 0,4$).

Konečná doporučení SIROCO budou k dispozici na internetových stránkách EU Bookshop <https://publications.europa.eu/en/web/general-publications/publications> ke konci roku 2018 a očekává se, že budou zařazeny do dalších vydání norem EN 1993-1-4 a EN 1090-2. Mezitím by měly být provedeny zkoušky k prokázání vhodnosti použití třecích spojů se šrouby z korozivzdorné oceli.

7.2.3 Spojované části

Otvory

Otvory pro šrouby mohou být vytvořeny vrtáním nebo prorážením. Avšak tvářením za studena spojeným s prorážením může být zvýšena náchylnost ke vzniku koroze, a proto jsou prorážené otvory méně vhodné do agresivních prostředí (například průmyslové a mořské prostředí).

Maximální tolerance v běžných otvorech jsou:

- 1 mm pro šrouby M12 a M14 (M14 není běžná velikost)
- 2 mm pro šrouby M16 až M24
- 3 mm pro šrouby M27 a větší

Rozmístění otvorů

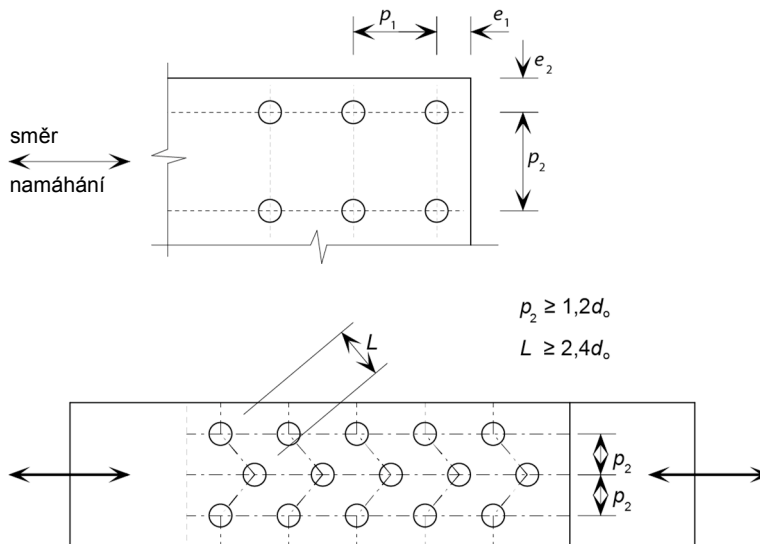
Vzdálenost k okrajům je definována jako vzdálenost od středu otvoru k hraně spojovaného prvku v pravém úhlu ke směru namáhání. Vzdálenost ke konci je definována podobně, ale ve směru namáhání.

Nejmenší hodnoty vzdálenosti ke konci, e_1 , nebo vzdálenosti k okraji, e_2 , (viz obrázek 7.2) mají být uvažovány jako $1,2d_0$, kde d_0 je průměr otvoru pro šroub. Vzdálenost ke konci může být nutné zvětšit kvůli zvýšení únosnosti v otláčení, viz níže.

Maximální vzdálenosti ke konci a k okraji mají být omezeny hodnotou $4t + 40$ mm, kde t je nejmenší z tlouštěk spojovaných prvků (v mm).

Minimální rozteč šroubů (vzdálenost středů otvorů) ve směru namáhání p_1 je $2,2d_0$ (viz obrázek 7.2). Minimální rozteč kolmo na směr namáhání p_2 je $2,4d_0$.

Maximální rozteče šroubů (vzdálenost středů otvorů) v obou směrech mají být stanoveny s ohledem na možné lokální vyboulení spojovaných prvků v důsledku namáhání, viz EN 1993-1-8.



Obrázek 7.2 Symboly označení roztečí otvorů

V případě vystřídáných řad šroubů je možné uvažovat minimální rozteč řad $p_2 = 1,2d_0$, pokud je vzdálenost mezi šrouby v sousedních řadách L rovna hodnotě $2,4d_0$ nebo větší, viz obrázek 7.2.

Únosnost v otláčení

Únosnost v otláčení šroubového spoje z korozivzdorné oceli má být stanovena na základě kritéria pevnosti nebo deformace. Návrhová únosnost šroubového spoje náchylného na otláčení $F_{b,Rd}$, je dána jako:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha_b k_t t d f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.1)$$

kde:

α_b je součinitel otláčení ve směru namáhání;

k_t je součinitel otláčení kolmo na směr namáhání;

- d je průměr šroubu;
 t je tloušťka spojovaného prvku;
 f_u je charakteristická hodnota meze pevnosti spojovaných prvků (tabulka 2.2).

Šroubové spoje jsou rozděleny do dvou skupin v závislosti na tloušťce spojovaných prvků. Spoje prvků o tloušťkách nad 4 mm jsou označeny jako tlustostěnné spoje, zatímco spoje prvků o tloušťkách 4 mm a méně jsou označeny jako tenkostěnné spoje.

Součinitele otláčení tlustostěnných spojů

Pro tlustostěnné spoje, kde deformace není rozhodujícím kritériem návrhu, se součinitel otláčení ve směru namáhání α_b stanoví podle rovnice (7.2), zatímco součinitel otláčení kolmo na směr namáhání k_t se stanoví podle rovnice (7.3).

$$\alpha_b = \min \left\{ 1,0, \quad \frac{e_1}{3d_0} \right\} \quad (7.2)$$

$$k_t = \begin{cases} 1,0 & \text{for } \left(\frac{e_2}{d_0}\right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{for } \left(\frac{e_2}{d_0}\right) \leq 1,5 \end{cases} \quad (7.3)$$

Pro tlustostěnné spoje, kde deformace je rozhodujícím kritériem návrhu, se součinitel otláčení ve směru namáhání α_b stanoví podle rovnice (7.4), zatímco součinitel otláčení kolmo na směr namáhání $k_t = 0,5$.

$$\alpha_b = \min \left\{ 1,0, \quad \frac{e_1}{2d_0} \right\} \quad (7.4)$$

Součinitele otláčení tenkostěnných spojů

Pro vnitřní prvek dvojstřížného tenkostěnného spoje, kde deformace není rozhodujícím kritériem návrhu, se součinitele α_b a k_t stanoví totožně jako v případě tlustostěnného spoje podle rovnic (7.2) a (7.3).

Pro jednostřížné tenkostěnné spoje a pro vnější prvky dvojstřížných tenkostěnných spojů, kde deformace není rozhodujícím kritériem návrhu, se součinitel otláčení α_b stanoví podle rovnice (7.4) a $k_t=0,64$.

Pro tenké spoje, kde deformace je rozhodujícím kritériem návrhu, se součinitel otláčení α_b stanoví podle rovnice (7.4) a $k_t=0,5$.

Očekává se, že v příštím vydání normy EN 1993-1-4 tato pravidla návrhu únosnosti v otláčení nahradí současná, konzervativnější, pravidla udávaná normou EN 1993-1-4, která jsou převzata z normy pro uhlíkovou ocel EN 1993-1-8 a využívající redukovanou hodnotu meze pevnosti $f_{u,red}$ namísto f_u :

$$f_{u,red} = 0,5f_y + 0,6f_u \quad (7.5)$$

Únosnost skupiny šroubů může být stanovena jako součet únosností v otláčení $F_{b,Rd}$ jednotlivých šroubů za předpokladu, že únosnost ve stříhu $F_{v,Rd}$ každého jednotlivého šroubu je stejná nebo větší, než únosnost v otláčení $F_{b,Rd}$. Jinak je nutné

únosnost skupiny šroubů stanovit jako nejmenší únosnost jednotlivých šroubů vynásobenou počtem šroubů.

Únosnost v tahu

Únosnost v tahu spojovaného prvku se stanoví jako menší z hodnot:

a) plastická únosnost plného průřezu

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.6)$$

b) mezní únosnost oslabeného průřezu (vliv otvorů)

$$N_{u,Rd} = \frac{k A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.7)$$

kde podmínky jsou uvedeny v části 5.7.2.

Pokud je vyžadováno tažné chování, plastická únosnost plného průřezu musí být menší než mezní únosnost oslabeného průřezu. Požadavky na tažnost a rotační kapacitu jsou uvedeny v normě EN 1993-1-8. Požadavky pro návrh na seizmicitu jsou uvedeny v normě EN 1998.

Návrh na vytržení skupiny šroubů

Pokyny pro posouzení vytržení skupiny šroubů jsou uvedeny v normě EN 1993-1-8.

Úhelníky připojené jedním ramenem a jiné nesymetricky připojené tažené pruty

Excentrické působení šroubů v koncových spojích prvků a vliv roztečí a vzdáleností šroubů od kraje je nutné zohlednit při stanovení návrhové únosnosti nesymetrických prvků, stejně jako nesymetricky připojených symetrických prvků jako jsou úhelníky se spoji provedenými pouze na jednom rameni.

Jednotlivý tažený úhelník připojený jednou řadou šroubů v jednom jeho rameni lze považovat jako centricky zatížený na účinné části plochy oslabeného průřezu. Návrhová únosnost se má stanovit podle následujících vztahů:

$$\text{Pro spoj s jedním šroubem:} \quad N_{u,Rd} = \frac{2,0 (e_2 - 0,5d_0) t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.8)$$

$$\text{Pro spoj se dvěma šrouby:} \quad N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.9)$$

$$\text{Pro spoj se třemi a více šrouby:} \quad N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.10)$$

kde:

β_2 a β_3 jsou redukční součinitele, které závisí na rozteči p_1 podle tabulky 7.1. Mezilehlé hodnoty pro p_1 a β lze stanovit lineární interpolací;

A_{net} je účinná průřezová plocha úhelníku. Pro nerovnoramenné úhelníky připojené kratším ramenem se A_{net} uvažuje jako průřezová plocha náhradního rovnoramenného úhelníku s rameny o velikosti kratšího ramene.

Tabulka 7.1 Redukční součinitele β_2 a β_3

Počet šroubů ve spoji	Součinitel	Rozteč, p_1	
		$\leq 2,5d_0$	$\geq 5,0d_0$
Dva šrouby	β_2	0,4	0,7
Tři a více šroubů	β_3	0,5	0,7

7.2.4 Šrouby

Plocha šroubu

Plocha průřezu šroubu použitá při posuzování šroubů v tahu se má uvažovat jako plocha jádra šroubu definovaná příslušnou normou.

V případě šroubů namáhaných smykem může být použita plocha v místě dřívku namísto plochy v místě závitu (jádro šroubu), jestliže lze zaručit, že závitová část šroubu nebude procházet rovinou stříhu; je nutné si uvědomit, že šrouby mohou být vkládány z obou směrů. Pokud tento požadavek není možné zaručit, má se ve výpočtech použít pouze plocha jádra šroubu.

Únosnost ve stříhu

Únosnost ve stříhu šroubového spoje je závislá na počtu střížných rovin a jejich umístění po délce šroubu. Pro jednotlivé roviny stříhu lze únosnost ve stříhu při nulovém tahovém namáhání stanovit jako:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (7.11)$$

kde:

A je plocha šroubu v místě dřívku (jestliže rovina stříhu prochází částí šroubu bez závitu); nebo plocha jádra šroubu (jestliže rovina stříhu prochází částí šroubu se závitem);

f_{ub} je mez pevnosti šroubu v tahu (tabulka 2.6).

Velikost hodnoty α může být stanovena Národní přílohou. Doporučuje se hodnota 0,6, která platí jak pro případ, kdy rovina stříhu prochází dřívkem tak závitem.

V normě EN 1993-1-4 se nachází chyba, udávající že hodnota α je v případě roviny stříhu procházející závitem doporučována 0,5. Očekává se, že v dalším vydání normy EN 1993-1-4 bude tato hodnota nahrazena hodnotou 0,6.

Únosnost v tahu

Únosnost šroubu v tahu $F_{t,Rd}$ je stanoví jako:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.12)$$

kde:

$k_2 = 0,63$ pro zapuštěné šrouby, jinak $k_2 = 0,9$.

Šrouby namáhané tahem mají být schopné odolávat i přídavným silám vznikajícím páčením, pokud může nastat. Pokyny pro návrh šroubů namáhaných tahem s vlivem páčení je uveden v normě EN 1993-1-8.

Kombinace stříhu a tahu

Při návrhu šroubů namáhaných kombinací smykového namáhání $F_{v,Ed}$ a tahového namáhání (včetně vlivu páčení) $F_{t,Ed}$, je nutné uvažovat interakci těchto namáhání. Návrh může být proveden pomocí interakční rovnice:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.13)$$

Tahová únosnost šroubu má být zároveň stejná nebo větší, než je hodnota návrhového tahového namáhání (včetně případného vlivu páčení).

Dlouhé spoje a velké svěrné délky

Pro spoje nadměrných délek (například 500 mm nebo $15d$ a více) nebo v případě nadměrné svěrné délky (tj. celková tloušťka spojovaných prvků) přesahující $5d$, se má únosnost ve stříhu redukovat. V případě nedostatku dat o šroubech z korozivzdorné oceli, se v těchto situacích doporučuje využít normy EN 1993-1-8 pro uhlíkovou ocel.

7.3 Spoje tenkostěnných materiálů

Návrh spojů tenkostěnných materiálů z korozivzdorné oceli pomocí samořezných šroubů může být proveden dle pokynů v normě EN 1993-1-3, avšak odolnost vůči vytržení má být stanovena zkouškou. Kvůli zabránění zadření šroubu a stržení závitu se má schopnost šroubu vrtat a tvořit závit v korozivzdorné oceli, pokud již nejsou získány dostatečné zkušenosti, prokázat zkouškami.

7.4 Svarové spoje

7.4.1 Obecné informace

Cyklos zahřátí a ochlazení při svařování nepříznivě ovlivňuje mikrostrukturu všech korozivzdorných ocelí, některé třídy jsou však ovlivněny více než ostatní. Především pro austeniticko-feritické oceli má tato skutečnost zvláštní význam, proto je důležité použít vhodné postupy svařování a přídavné svařovací materiály, a zajistit, aby svařování prováděli pouze dostatečně zkušení svářeči (viz část 11.6). Je to důležité nejen kvůli zajištění pevnosti svaru a dosažení požadovaného tvaru svaru, ale také kvůli zachování odolnosti vůči korozi svaru a okolního materiálu.

Následující doporučení se vztahují na tupé svary s částečným nebo plným průvarem a koutové svary zhotovené obloukovým svařováním, jako je:

Číslo procesu	Název procesu
111	Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
121	Svařování pod tavidlem drátovou elektrodou
122	Svařování pod tavidlem páskovou elektrodou
131	Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG)
135	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (MAG)
137	Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu

- 141 Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (TIG)
 15 Plazmové svařování

(Číslo procesů jsou uvedena v normě EN ISO 4063.)

Svarový materiál má být zvolen tak, aby předepsaná mez kluzu, mez pevnosti v tahu, tažnost a nejmenší hodnota vrubové houževnatosti svarového kovu byla stejná nebo lepší než je stanoveno pro základní materiál. V případě austenitických ocelí tvářených za studena je umožněno, aby svarový kov měl menší jmenovitou pevnost než základní materiál (viz část 7.4.4). Vhodné svarové materiály pro různé třídy korozivzdorné oceli jsou uvedeny v tabulce 7.2.

Při svařování korozivzdorné oceli k uhlíkové oceli mají být svarové kovy vysoce legovány, aby byly zabezpečeny odpovídající mechanické vlastnosti a odolnost vůči korozi spojů. Použití vysoce legovaných svarových kovů zabraňuje zředění spojovaných prvků v tavné zóně svaru základního korozivzdorného materiálu. V případě svařování korozivzdorné oceli k pozinkované oceli je nutné před svařováním odstranit vrstvu zinku kolem oblasti, kde bude proveden spoj. Přítomnost zinku při svařování může způsobit zkřehnutí nebo snížit odolnost vůči korozi zhotoveného svaru a výpary vznikající během tohoto svařování představují významné zdravotní riziko. Jakmile je vrstva zinku odstraněna, požadavky na svařování jsou stejné jako při svařování korozivzdorné oceli k uhlíkové oceli.

Tabulka 7.2 Příklady vhodných tříd oceli a svařovacích materiálů

Základní materiál		Svařovací materiál	
Typ oceli	Třída	EN ISO 3581:2012 Svařovací materiály - Obalené elektrody pro ruční obloukové svařování antikoročních a žáruvzdorných ocelí - Klasifikace	EN ISO 14343:2009 Svařovací materiály - Drátové elektrody, páskové elektrody, dráty a tyče pro tavné svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí - Klasifikace
Austenitická	1.4301, 1.4307, 1.4318	19 9 L	
	1.4541	19 9 L nebo 19 9 Nb	
	1.4401, 1.4404	19 12 3 L	
	1.4571	19 12 3 L nebo 19 12 3 Nb	
Austeniticko-feritická	1.4482, 1.4162, 1.4362, 1.4062	23 7 N L nebo 22 9 3 N L	
	1.4062 (2202)	23 7 N L nebo 22 9 3 N L	
	1.4662, 1.4462	22 9 3 N L	
Feritická	1.4003	13 nebo 19 9 L	
	1.4016	19 9 L nebo 23 12 L	
	1.4509	19 9 Nb nebo 18 8 Mn	
	1.4521	19 12 3 L nebo 23 12 2L	
Svařovací materiály austenitických ocelí mají minimální 0,2% smluvní mez kluzu v rozmezí 320-350 N/mm ² a mez pevnosti v tahu v rozmezí 510-550 N/mm ² .			
Svařovací materiály austeniticko-feritických ocelí mají minimální 0,2% smluvní mez kluzu okolo 450 N/mm ² a mez pevnosti v tahu okolo 550 N/mm ² .			

Výrobci korozivzdorných ocelí a svarového materiálu mohou pomoci s jeho vhodným výběrem. Svarové kovy mají být ušlechtilé minimálně tak, jako základní materiál.

Kvůli snížení riziku vzniku koroze se nedoporučuje používat přerušované koutové svary a přerušované tupé svary s částečným průvarem vůbec nebo pouze v nejmírnějších prostředích. Je třeba dbát zvýšené opatrnosti při používání přerušovaných koutových svarů v přímořských oblastech nebo ve velmi silně znečištěných prostředích, zejména tam, kde může dojít k proudění vody.

7.4.2 Koutové svary

Použití

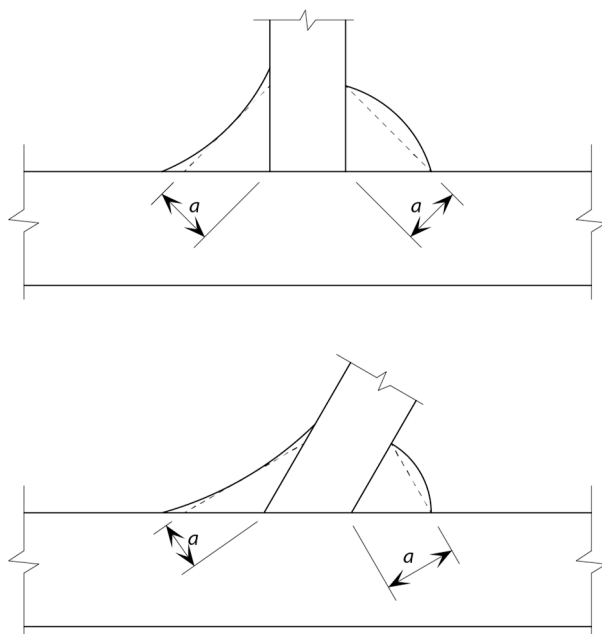
Koutové svary lze použít na spoje částí, jejichž natavené plochy svírají úhel mezi 60° a 120° . Úhly menší než 60° se také přípouštějí, ale svar se má uvažovat jako tupý s částečným provařením. Při úhlech větších než 120° nemají být použity pro přenášení zatížení.

Koutový svar nemá být používán v případech, kde by ohybový moment působící kolem podélné osy svaru způsobil tahové napětí v místě kořene svaru.

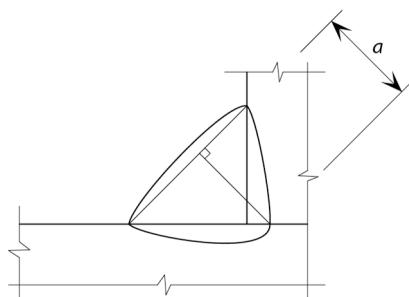
Účinná délka a tloušťka svaru

Účinná délka koutového svaru se má uvažovat jako délka, ve které má svar plný průřez. Koutové svary s délkou menší než 30 mm nebo menší než šestnásobek tloušťky svaru nemají být použity pro přenášení zatížení.

Účinná tloušťka koutového svaru a se má uvažovat jako výška největšího úhelníku (se stejnými nebo nestejnými rameny) vepsaného mezi tavné plochy a povrch svaru, měřeného kolmo k přeponě tohoto trojúhelníka, viz obrázek 7.3. Při určení návrhové únosnosti koutového svaru s hlubokým provařením lze provaření započítat do účinné tloušťky svaru (viz obrázek 7.4) za předpokladu, že předběžné zkoušky prokáží, že lze dosáhnout požadovaného provaření.



Obrázek 7.3 Účinná tloušťka koutového svaru



Obrázek 7.4 Účinná tloušťka koutového svaru s hlubokým průvarem

Návrhová napětí a návrhová smyková pevnost

Návrhová hodnota napětí, které má svar přenést, se získá jako vektorový součet namáhání vzniklých v důsledku působení všech sil a momentů. Návrhová hodnota napětí se spočítá pro účinnou délku a tloušťku svaru (viz výše).

Návrhová únosnost koutového svaru je dostatečná, jsou-li splněny obě následující podmínky:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (7.14)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.15)$$

kde:

- σ_{\perp} je normálově napětí kolmé na účinný rozměr svaru;
- τ_{\perp} je smykové napětí (v účinné rovině průřezu) kolmé na osu svaru;
- τ_{\parallel} je smykové napětí (v účinné rovině průřezu) rovnoběžné s osou svaru;
- f_u je jmenovitá hodnota meze pevnosti nejslabší spojované části v tahu;
- β_w je korelační součinitel; pro všechny korozivzdorné oceli se uvažuje jako 1,0, pokud není jeho nižší hodnota ověřena zkouškami.

Alternativně lze pro výpočet návrhové únosnosti koutového svaru využít zjednodušenou metodu dle části 4.5.3.3 normy EN 1993-1-8.

7.4.3 Tupé svary

Tupé svary s plným průvarem

Návrhová únosnost tupých svarů s plným průvarem se v případě, že svar splňuje požadavky uvedené v části 7.4.1, uvažuje jako hodnota rovnající se návrhové únosnosti nejslabší spojované části.

Tupý svar s částečným průvarem

Tupé svary s částečným průvarem mohou být využity pro přenos smykových sil. Nedoporučuje se tyto svary využívat v místech, kde by mohly být vystaveny tahovému namáhání.

Návrhová únosnost tupého svaru s částečným průvarem se má stanovit pomocí metod pro hluboce provařené koutové svary. Účinná tloušťka svaru s částečným průvarem může být brána jako hloubka průvaru, kterou lze dle procedurálních

zkoušek trvale dosahovat. Při absenci procedurálních zkoušek lze předpokládat, že účinná tloušťka svaru je rovna hloubce úkosu svaru mínus 3 mm.

7.4.4 Svařování korozivzdorné oceli tvářené za studena

Pro svařování korozivzdorné oceli tvářené za studena obecně platí stejné zásady jako pro svařování žíhané korozivzdorné oceli. Avšak únosnost základního materiálu v tepelně ovlivněných oblastech koutových svarů má být považována za mez pevnosti v tahu základního materiálu.

V případě, že je výpočet návrhové únosnosti koutového nebo tupého svaru založen na jmenovité hodnotě meze pevnosti v tahu svarového materiálu s uvažováním součinitele β_w jako 1,0 (tabulka 7.2), svarový kov může mít menší jmenovitou pevnost v tahu než základní materiál.

Při svařování austenitických ocelí tvářených za studena se mají používat austenitické svarové materiály. Lze použít také austeniticko-feritický svarový materiál, ale pouze za předpokladu zkušebního ověření mechanických vlastností spoje.

V případě svařování za studena tvářených materiálů může být důsledkem neúplného žíhání tepelně ovlivněných oblastí svaru aktuální pevnost spoje vyšší než vypočtená pevnost s uvažováním úplného žíhání. Za těchto okolností může být stanovena vyšší návrhová pevnost pomocí zkoušek.

8 NÁVRH NA ÚČINKY POŽÁRU

8.1 Všeobecně

Tato kapitola se zabývá návrhem konstrukcí z korozivzdorných ocelí, u kterých je s ohledem na požární bezpečnost požadavek na splnění nosné funkce ve smyslu zabránění předčasného kolapsu konstrukce při vystavení požáru. Návrhová pravidla se týkají pouze pasivních metod požární ochrany a je možné jich použít pouze pro třídy korozivzdorných ocelí a konstrukce, které je možné navrhovat podle kapitol 4 až 7 této příručky.

Austenitické oceli obecně zachovávají vyšší podíl jejich původní pevnosti (za běžné teploty) při teplotách nad cca 550 °C. Všechny korozivzdorné oceli pak zachovávají vyšší podíl jejich původní tuhosti než oceli uhlíkové a to pro všechny teploty.

Norma EN 1991-1-2 uvádí teplotní a mechanické účinky na konstrukce vystavené požáru. Požár je v Eurokódech uvažován jako mimořádná návrhová situace. EN 1990 uvádí kombinaci účinků zatížení pro mimořádnou návrhovou situaci a doporučuje, aby součinitel spolehlivosti zatížení byl uvažován hodnotou 1,0. EN 1993-1-2 pak doporučuje součinitel spolehlivosti materiálu $\gamma_{M,fi}$ pro případ požáru uvažovat hodnotou 1,0.

Požadavky na chování konstrukcí z korozivzdorných ocelí se neliší od požadavků na konstrukce z uhlíkových ocelí, jmenovitě:

- Pokud je požadována únosnost za požáru, konstrukce by měla být navržena a zhotovena tak, aby zachovala svou nosnou funkci během příslušného vystavení účinkům požáru;
- Kritérium deformace má být použito tam, kde prostředky požární ochrany nebo návrhová kritéria pro jednotlivé prvky vyžadují zohlednit deformaci nosné konstrukce. Nicméně není nutné uvažovat deformaci nosné konstrukce, pokud je požární odolnost jednotlivých prvků založena na normové požární křivce.

8.2 Mechanické vlastnosti při zvýšené teplotě

EN 1993-1-2:2005 uvádí, na rozdíl od jedné sady redukčních součinitelů pevnostních charakteristik při zvýšené teplotě pro uhlíkovou ocel, osm sad pro různé třídy korozivzdorných ocelí. Větší počet sad redukčních součinitelů je pro korozivzdorné oceli odůvodněný, neboť mechanické vlastnosti při zvýšené teplotě se mezi jednotlivými třídami korozivzdorných ocelí s ohledem na jejich chemické složení významně liší. V příští revizi normy EN 1993-1-2 budou korozivzdorné oceli s podobnými vlastnostmi při zvýšené teplotě shrnuty do skupin s tím, že budou uvedeny redukční součinitele pro jednotlivé skupiny, které nahradí v současnosti používané součinitele pro jednotlivé třídy ocelí. Tyto zobecněné redukční součinitele jsou rovněž použity v této kapitole.

Tabulka 8.1 uvádí redukční součinitele pro pevnost a tuhost sedmi skupin korozivzdorných ocelí, které se vztahují k příslušné hodnotě pracovního diagramu při 20 °C. Součinitele jsou popsány níže:

$k_{p0,2,\theta}$ je redukční součinitel návrhové meze kluzu uvažované jako smluvní mez 0,2 % protažení při teplotě θ vztažený k mezi kluzu při 20°C, konkrétně:

$$k_{p0,2,\theta} = f_{p0,2,\theta} / f_y \quad (8.1)$$

$k_{2,\theta}$ je redukční součinitel pevnosti odpovídající napětí při dosažení 2 % celkového přetvoření při teplotě θ vztažené k mezi kluzu při 20°C, konkrétně:

$$k_{2,\theta} = f_{2,\theta} / f_y \quad \text{ale} \quad f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta} \quad (8.2)$$

$k_{u,\theta}$ je redukční součinitel meze pevnosti při teplotě θ vztažené k mezi pevnosti při 20°C, konkrétně:

$$k_{u,\theta} = f_{u,\theta} / f_u \quad (8.3)$$

$k_{E,\theta}$ je redukční součinitel pro sklon lineární pružné části pracovního diagramu při teplotě θ vztaženého ke sklonu při 20°C, konkrétně:

$$k_{E,\theta} = E_\theta / E \quad (8.4)$$

$k_{\epsilon u,\theta}$ je poměrné přetvoření při dosažení meze pevnosti při teplotě θ vztažené k témuž přetvoření při 20°C, konkrétně:

$$k_{\epsilon u,\theta} = \epsilon_{u,\theta} / \epsilon_u \quad (8.5)$$

kde:

E je modul pružnosti materiálu při 20°C ($=200 \times 10^3$ N/mm²);

f_y je charakteristická hodnota meze kluzu při 20°C, definovaná v části 2.3;

f_u je charakteristická hodnota meze pevnosti při 20°C, definovaná v části 2.3.

Pro materiál zpracovaný za studena, nebo v případě kdy se do výpočtu zahrnuje zvýšení pevnosti vlivem tváření za studena během výroby průřezu, se mají uvažovat následující redukční součinitele:

$$k_{p0,2,\theta,CF} = k_{p0,2,\theta} \quad 200 \leq \theta \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{p0,2,\theta,CF} = 0,8 k_{p0,2,\theta} \quad \theta \geq 800 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{2,\theta,CF} = k_{2,\theta} \quad 200 \leq \theta \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{2,\theta,CF} = 0,9 k_{2,\theta} \quad \theta \geq 800 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta} \quad \text{Pro všechny teploty}$$

Kde se index CF vztahuje k materiálu zpracovanému za studena / materiálu za studena tvářenému.

Pro jednoduché výpočetní modely stanovení požární odolnosti uvedené v části 8.3 se mají použít následující pevnostní charakteristiky materiálu:

Sloupy	$f_{p0,2,\theta}$	(všechny třídy průřezu);
Nosníky bez vlivu klopení	$f_{2,\theta}$	(třída průřezu 1 až 3);
	$f_{p0,2,\theta}$	(třída průřezu 4);
Nosníky s vlivem klopení	$f_{p0,2,\theta}$	(všechny třídy průřezu);
Tažené pruty	$f_{2,\theta}$	(všechny třídy průřezu).

Tabulka 8.1 Redukční součinitele pro určení pevnosti, tuhosti a poměrného přetvoření při zvýšené teplotě

Teplota θ (°C)	Součinitel $k_{p,2,\theta}$	Součinitel $k_{2,\theta}$	Součinitel $k_{u,\theta}$	Součinitel $k_{E,\theta}$	Součinitel $k_{\epsilon u,\theta}$
Austenitické oceli I 1.4301, 1.4307, 1.4318					
20	1,00	1,31	1,00	1,00	1,00
100	0,78	1,02	0,81	0,96	0,56
200	0,65	0,88	0,72	0,92	0,42
300	0,60	0,82	0,68	0,88	0,42
400	0,55	0,78	0,66	0,84	0,42
500	0,50	0,73	0,61	0,80	0,42
600	0,46	0,68	0,54	0,76	0,33
700	0,38	0,54	0,40	0,71	0,24
800	0,25	0,35	0,25	0,63	0,15
900	0,15	0,18	0,13	0,45	0,15
1000	0,07	0,08	0,08	0,20	0,20
1100	0,05	0,06	0,05	0,10	-
Austenitické oceli II 1.4401, 1.4404, 1.4541					
20	1,00	1,19	1,00	1,00	1,00
100	0,86	1,13	0,87	0,96	0,56
200	0,72	0,98	0,80	0,92	0,42
300	0,67	0,92	0,78	0,88	0,42
400	0,62	0,85	0,77	0,84	0,42
500	0,60	0,82	0,74	0,80	0,42
600	0,56	0,75	0,67	0,76	0,33
700	0,50	0,68	0,51	0,71	0,24
800	0,41	0,50	0,34	0,63	0,15
900	0,22	0,26	0,19	0,45	0,15
1000	0,14	-	0,10	0,20	0,20
1100	0,07	-	0,07	0,10	-
Austenitické oceli III 1.4571					
20	1,00	1,31	1,00	1,00	1,00
100	0,89	1,16	0,88	0,96	0,56
200	0,82	1,07	0,81	0,92	0,42
300	0,77	1,01	0,79	0,88	0,42
400	0,72	0,95	0,79	0,84	0,42
500	0,69	0,91	0,77	0,80	0,42
600	0,65	0,85	0,71	0,76	0,33
700	0,59	0,76	0,57	0,71	0,24
800	0,51	0,63	0,38	0,63	0,15
900	0,29	0,38	0,23	0,45	0,15
1000	0,15	0,18	0,10	0,20	0,20
Austeniticko-feritické oceli I 1.4362, 1.4062, 1.4482					
20	1,00	1,15	1,00	1,00	1,00
100	0,83	0,94	0,94	0,96	1,00
200	0,75	0,82	0,87	0,92	1,00
300	0,69	0,77	0,79	0,88	1,00
400	0,58	0,70	0,70	0,84	1,00
500	0,43	0,59	0,59	0,80	1,00
600	0,27	0,45	0,47	0,76	1,00
700	0,14	0,28	0,33	0,71	0,80
800	0,07	0,14	0,20	0,63	0,60
900	0,04	0,05	0,09	0,45	0,40

Tabulka 8.1 (pokračování) *Redukční součinitele pro určení pevnosti, tuhosti a poměrného přetvoření při zvýšené teplotě*

Teplota θ (°C)	Součinitel $k_{p0,2,\theta}$	Součinitel $k_{2,\theta}$	Součinitel $k_{u,\theta}$	Součinitel $k_{E,\theta}$	Součinitel $k_{\epsilon u,\theta}$
Austeniticko-feritické oceli II 1.4462, 1.4162, 1.4662					
20	1,00	1,12	1,00	1,00	1,00
100	0,82	0,96	0,96	0,96	0,87
200	0,70	0,86	0,91	0,92	0,74
300	0,65	0,82	0,88	0,88	0,74
400	0,60	0,76	0,82	0,84	0,74
500	0,53	0,67	0,71	0,80	0,74
600	0,42	0,55	0,56	0,76	0,74
700	0,27	0,37	0,38	0,71	0,44
800	0,15	0,21	0,22	0,63	0,14
900	0,07	0,11	0,14	0,45	0,14
1000	0,01	0,03	0,06	0,20	0,14
Feritické oceli I 1.4509, 1.4521, 1.4621					
20	1,00	1,12	1,00	1,00	1,00
100	0,88	1,01	0,93	0,98	1,00
200	0,83	0,99	0,91	0,95	1,00
300	0,78	0,92	0,88	0,92	1,00
400	0,73	0,90	0,82	0,86	0,75
500	0,66	0,86	0,78	0,81	0,75
600	0,53	0,71	0,64	0,75	0,75
700	0,39	0,48	0,41	0,54	0,75
800	0,10	0,13	0,11	0,33	0,75
900	0,04	0,04	0,03	0,21	0,75
1000	0,02	0,02	0,01	0,09	0,75
Feritické oceli II 1.4003, 1.4016					
20	1,00	1,19	1,00	1,00	1,00
100	0,93	1,12	0,93	0,98	1,00
200	0,91	1,09	0,89	0,95	1,00
300	0,89	1,04	0,87	0,92	1,00
400	0,87	1,08	0,84	0,86	0,75
500	0,75	1,01	0,82	0,81	0,75
600	0,43	0,48	0,33	0,75	0,75
700	0,16	0,18	0,13	0,54	0,75
800	0,10	0,12	0,09	0,33	0,75
900	0,06	0,09	0,07	0,21	0,75
1000	0,04	0,06	0,05	0,09	0,75

8.3 Stanovení požární odolnosti konstrukcí

Ke stanovení požární odolnosti je možné použít následující návrhové metody:

- Jednoduché výpočetní modely;
- Zpřesněné výpočetní modely;
- Zkoušky.

Jednoduché výpočetní modely jsou zjednodušené návrhové metody pro jednotlivé prvky, které jsou založeny na konzervativních předpokladech. Zpřesněné výpočetní modely jsou návrhové metody, využívající vhodným způsobem inženýrské principy pro konkrétní aplikace. Kde nejsou uvedeny jednoduché výpočetní modely, je nutné použít buď zpřesněné výpočetní modely, nebo postup založený na výsledcích zkoušek.

EN 1993-1-2 používá jednoduché výpočetní modely pro uhlíkové oceli i pro oceli korozivzdorné. Nicméně, některé z těchto jednoduchých metod byly pro korozivzdorné oceli shledány velmi konzervativními a předpokládá se, že budou při další revizi normy EN 1993-1-2 nahrazeny upravenými vztahy uvedenými v části 8.3, které lze shrnout jako:

1. Použití $f_{p0,2,\theta}$ (místo $f_{2,\theta}$) pro stanovení:
 - Vzpěrné únosnosti sloupu (všechny třídy průřezu);
 - Momentové únosnosti nosníku třídy průřezu 4 bez vlivu klopení;
 - Momentové únosnosti nosníku s vlivem klopení (všechny třídy průřezu).
2. Použití hodnoty ε pro klasifikaci průřezu v závislosti na teplotě.
3. Použití vzpěrnostních křivek a křivek klopení shodných s návrhem při běžné teplotě.

8.3.2 Klasifikace průřezu

Pro návrh za požáru se využije metody klasifikace průřezu uvedené v kapitole 5 této publikace, přičemž se použije hodnota ε závislá na teplotě:

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon \left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} \quad (8.6)$$

Alternativně lze použít následující konzervativní hodnotu ε používající návrhové charakteristiky při 20°C:

$$\varepsilon = 0,85 \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} \quad (8.7)$$

kde:

$k_{y,\theta}$ je buď $k_{p0,2,\theta}$ nebo $k_{2,\theta}$, v závislosti na způsobu zatížení a třídě průřezu (viz část 8.2).

8.3.3 Tažené pruty

Návrhovou únosnost $N_{fi,\theta,Rd}$ taženého prvku při rovnoměrném rozdělení teploty θ lze stanovit jako:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M0}/\gamma_{M,fi}] \quad (8.8)$$

kde:

$k_{2,\theta}$ je redukční součinitel meze kluzu uvažované jako napětí při 2 % poměrného přetvoření při teplotě θ ;

N_{Rd} je návrhová únosnost průřezu $N_{pl,Rd}$ při navrhování za běžné teploty podle části 5.7.2;

γ_{M0} a $\gamma_{M,fi}$ jsou součinitele spolehlivosti, viz tabulka 4.1 a část 8.1.

Při nerovnoměrném rozdělení teploty po průřezu lze návrhovou únosnost stanovit z výrazu:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i k_{2,\theta_i} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (8.9)$$

kde:

A_i je plocha dílčí části průřezu prvku;

θ_i je teplota dílčí části průřezu na ploše A_i ;

k_{2,θ_i} je redukční součinitel meze kluzu uvažované jako napětí při 2 % poměrného přetvoření při teplotě θ_i (viz část 8.2).

Návrhovou únosnost $N_{fi,t,Rd}$ v čase t taženého prvku při nerovnoměrném rozdělení teploty po průřezu lze konzervativně uvažovat jako požární únosnost $N_{fi,\theta,Rd}$ taženého prvku při rovnoměrném rozdělení teploty oceli θ , rovné nejvyšší teplotě θ_{max} dosažené v čase t .

8.3.4 Tlačené prvky

Návrhová vzpěrná únosnost $N_{b,fi,t,Rd}$ tlačených prvků v čase t se má při rovnoměrném rozdělení teploty θ určit z výrazu:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{pro průřezy třídy 1 až 3} \quad (8.10)$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A_{eff} k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{pro průřezy třídy 4} \quad (8.11)$$

kde:

$k_{p0,2,\theta}$ je redukční součinitel meze kluzu uvažované jako smluvní mez 0,2 % protažení při teplotě θ (viz část 8.2).

χ_{fi} je součinitel vzpěrnosti při návrhové požární situaci stanovený jako:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad \text{ale } \chi_{fi} \leq 1 \quad (8.12)$$

kde:

$$\phi_{\theta} = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right] \quad (8.13)$$

ve kterém α a $\bar{\lambda}_0$ jsou parametry křivky vzpěrnosti dané hodnotami pro návrh při běžné teplotě dle tab. 6.1 nebo tab. 6.2.

Poměrná štíhlost $\bar{\lambda}_{\theta}$ se po zmíněné modifikaci stanoví pro teplotu θ z výrazu:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{p0,2,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{pro všechny třídy průřezu} \quad (8.14)$$

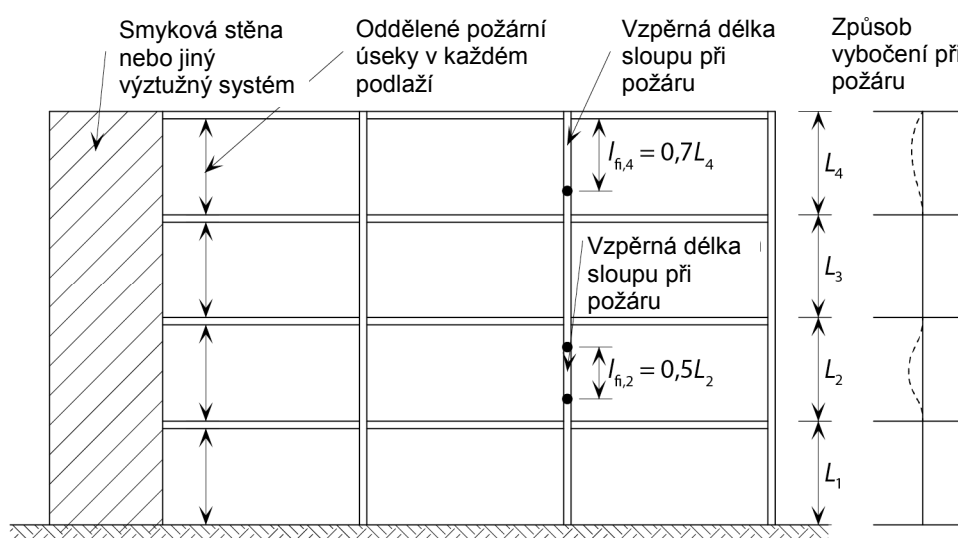
kde:

$k_{E,\theta}$ je redukční součinitel pro sklon lineární pružné části pracovního diagramu při teplotě θ (viz část 8.2).

Při navrhování tlačенého prvku s nerovnoměrným rozdělením teploty po průřezu je možné návrhovou únosnost konzervativně stanovit s uvažováním nejvyšší teploty na prvku pro celý průřez.

Vzpěrná délka l_{fi} sloupu pro požární návrhovou situaci má být obecně určena jako při návrhu pro běžnou teplotu. Avšak u vyztužených rámu může být vzpěrná délka sloupu l_{fi} průběžně, nebo částečně průběžně spojeného nahoře a dole se sloupem v požárním úseku, určena s uvažováním jeho podepření ve styčnicích, za předpokladu, že požární odolnost stavebních částí, které oddělují tyto požární úseky, není menší než požární odolnost vyšetřovaného sloupu.

U vyztuženého rámu, jehož každé podlaží tvoří požární úsek s dostatečnou požární odolností, může být vzpěrná délka sloupu v mezilehlém podlaží $l_{fi} = 0,5L$ a v nejvyšším podlaží $l_{fi} = 0,7L$, kde L je systémová délka v uvažovaném podlaží, viz obrázek 8.1.



Obrázek 8.1 Vzpěrné délky l_{fi} sloupů vyztužených rámu

8.3.5 Nosníky zajištěné proti ztrátě stability

Návrhová momentová únosnost $M_{fi,\theta,Rd}$ průřezů třídy s rovnoměrnou teplotou θ má být určena z výrazu:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} \left[\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right] \quad \text{pro třídu průřezu 1 až 3} \quad (8.15)$$

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{p0,2,\theta} M_{Rd} \left[\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right] \quad \text{pro třídu průřezu 4} \quad (8.16)$$

kde:

M_{Rd} je plastická návrhová momentová únosnost neoslabeného průřezu $M_{pl,Rd}$ (pro třídu průřezu 1 a 2), pružná návrhová momentová únosnost neoslabeného průřezu $M_{el,Rd}$ (pro třídu průřezu 3) nebo návrhová momentová únosnost účinného průřezu $M_{eff,Rd}$ (pro třídu průřezu 4) při běžné teplotě.

$k_{2,\theta}$ a $k_{p0,2,\theta}$ jsou definovány v části 8.2.

Pokud je nutné zohlednit vliv smyku, uvažuje se ve výpočtu redukovaná momentová únosnost za běžné teploty podle části 5.7.6.

Návrhovou momentovou únosnost průřezu $M_{fi,t,Rd}$ v čase t při nerovnoměrném rozdělení teploty je možné konzervativně stanovit z výrazu:

$$M_{fi,t,Rd} = \left[\frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2} \right] \quad (8.17)$$

kde:

$M_{fi,\theta,Rd}$ je momentová únosnost neoslabeného průřezu (nebo účinného průřezu třídy 4) pro rovnoměrné rozdělení teploty θ odpovídající maximální hodnotě teploty v průřezu, který není teplotně ovlivněn podporami;

κ_1 je součinitel podmínek působení pro nerovnoměrné rozdělení teploty po průřezu, viz tabulka 8.2;

κ_2 je součinitel podmínek působení pro nerovnoměrné rozdělení teploty podél nosníku, viz tabulka 8.2.

Tabulka 8.2 Součinitele podmínek působení

Způsob vystavení prvku požáru	κ_1
nosník, který je vystaven požáru ze všech čtyř stran	1,0
pro nechráněný nosník, který je vystaven požáru ze tří stran, se spřaženou nebo betonovou deskou na čtvrté straně	0,70
pro chráněný nosník, který je vystaven požáru ze tří stran, se spřaženou nebo betonovou deskou na čtvrté straně	0,85
	κ_2
v podporách staticky neurčitého nosníku	0,85
ve všech ostatních případech	1,0

Návrhová únosnost ve smyku $V_{fi,t,Rd}$ v čase t se má pro průřez s nerovnoměrným rozdělením teploty stanovit z výrazu:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{2,\theta_{web}} V_{Rd} \left[\frac{Y_{M0}}{Y_{M,fi}} \right] \quad \text{pro třídu průřezu 1 až 3} \quad (8.18)$$

$$V_{fi,t,Rd} = k_{p0,2,\theta_{web}} V_{Rd} \left[\frac{Y_{M0}}{Y_{M,fi}} \right] \quad \text{pro třídu průřezu 4} \quad (8.19)$$

kde:

V_{Rd} je smyková únosnost neoslabeného průřezu při běžné teplotě podle části 5.7.5 (pro teploty nad 400°C, se má η uvažovat hodnotou 1,0);

θ_{web} je teplota na stojině průřezu.

8.3.6 Nosníky nezajištěné proti ztrátě stability

Návrhová momentová únosnost $M_{b,fi,t,Rd}$ v čase t nosníku který není zajištěn proti ztrátě stability při ohybu se má určit z výrazu:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{pro třídu průřezu 1 až 2} \quad (8.20)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi} W_{el,y} k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{pro třídu průřezu 3} \quad (8.21)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi} W_{eff,y} k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{pro třídu průřezu 4} \quad (8.22)$$

kde:

$\chi_{LT,fi}$ je součinitel klopení při návrhové požární situaci určený z rovnice:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} \quad \text{ale } \chi_{LT,fi} \leq 1 \quad (8.23)$$

$$\phi_{LT,\theta} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,\theta} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2 \right] \quad (8.24)$$

ve které:

α_{LT} je součinitel imperfekce pro návrh při běžné teplotě uvedený v části 6.4.2;

$k_{p0,2,\theta}$ je redukční součinitel uvedený v části 8.2 pro maximální teplotu dosaženou kdekoli na průřezu.

Poměrná štíhlost nosníku $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$ při teplotě θ je dána:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \left[\frac{k_{p0,2,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{pro všechny třídy průřezů} \quad (8.25)$$

kde:

$k_{E,\theta}$ je redukční součinitel pro teplotu θ uvedený v části 8.2.

8.3.7 Ohýbané a osově tlačené prvky

Pro zabránění předčasného vybočení k hlavní a vedlejší ose vybočení a klopení se má účinek působení osové tlakové síly a ohybového momentu ověřit pomocí následujících vztahů:

a) Pro průřezy třídy 1 až 3:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.26)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min1,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.27)$$

kde:

$N_{fi,Ed}$, $M_{y,fi,Ed}$ a $M_{z,fi,Ed}$ je návrhová osová síla a ohybové momenty při požární situaci;

$M_{y,fi,\theta,Rd}$ a $M_{z,fi,\theta,Rd}$ jsou uvedeny v části 8.3.5;

$\chi_{\min,fi}$ je nejmenší ze součinitelů vzpěrnosti pro rovinný vzpěr, vzpěr zkroucením a prostorový vzpěr při teplotě θ , jak je uvedeno v části 8.3.4;

$\chi_{\min1,fi}$ je nejmenší ze součinitelů vzpěrnosti pro rovinný vzpěr k ose z , vzpěr zkroucením a prostorový vzpěr při teplotě θ , jak je uvedeno v části 8.3.4;

$\chi_{LT,fi}$ je součinitel klopení při teplotě θ , jak je uvedeno v části 8.3.6.

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (8.28)$$

$$\mu_{LT} = 0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9 \quad (8.29)$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (8.30)$$

$$\mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8 \quad (8.31)$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (8.32)$$

$$\mu_z = (2\beta_{M,z} - 5) \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,44\beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8 \text{ a } \bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1,1 \quad (8.33)$$

β_M je součinitel ekvivalentního momentu uvedený v tabulce 8.3.

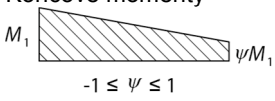
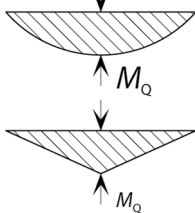
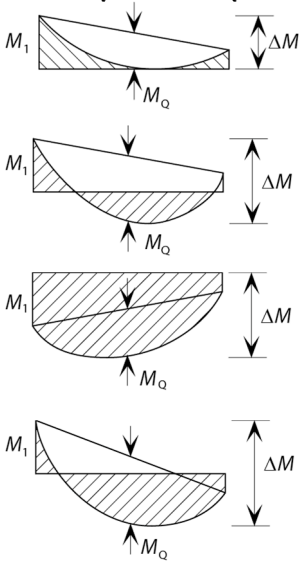
b) Pro průřezy třídy 4:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} A_{\text{eff}} k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.34)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min1,fi} A_{\text{eff}} k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{\chi_{LT,fi} M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.35)$$

kde jednotlivé výrazy byly již popsány výše v odstavci (a), pouze při výpočtu k_y , k_z a k_{LT} se místo plochy průřezu A použije účinná plocha A_{eff} .

Tabulka 8.3 Součinitel ekvivalentního momentu, β_M

Momentový obrazec	Součinitele ekvivalentního momentu β_M
<p>Koncové momenty</p>  <p>M_1 ψM_1 $-1 \leq \psi \leq 1$</p>	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\psi$
<p>Momenty od příčného zatížení</p>  <p>M_Q M_Q</p>	$\beta_{M,Q} = 1,3$ $\beta_{M,Q} = 1,4$
<p>Momenty od příčného zatížení působícího v rovině ohybu spolu s koncovými momenty</p>  <p>M_1 M_Q ΔM M_1 M_Q ΔM M_1 M_Q ΔM M_1 M_Q ΔM</p>	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ <p>$M_Q = \max M$ vyvozený pouze příčným zatížením</p> <p>Pro obrazec ohybového momentu bez změny znaménka: $\Delta M = \max M$</p> <p>Pro momentový obrazec se změnou znaménka: $\Delta M = \max M + \min M$</p>

8.4 Tepelné vlastnosti při vysoké teplotě

8.4.1 Teplotní roztažnost

Poměrnou teplotní roztažnost korozivzdorné austenitické oceli $\Delta l/l$ lze stanovit následovně:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{(16 + 4,79 \times 10^{-3}\theta - 1,243 \times 10^{-6}\theta^2) \times (\theta - 20)}{10^6} \quad (8.36)$$

kde:

l je délka při 20°C;

Δl je prodloužení vyvolané teplotou;

θ je teplota oceli (°C).

Tabulka 8.4 uvádí střední hodnotu součinitele teplotní roztažnosti pro austenitické, austeniticko-feritické a feritické korozivzdorné oceli pro různá rozmezí teplot.

Tabulka 8.4 Střední hodnota koeficientu teplotní roztažnosti

Rozmezí teplot oceli (°C)	Střední hodnota koeficientu teplotní roztažnosti (10 ⁻⁶ /°C)		
	Austenitická ocel	Austeniticko-feritická ocel	Feritická ocel
20 - 100	16,7	13,2	10,3
20 - 200	17,2	13,9	10,7
20 - 300	17,7	14,3	11,1
20 - 400	18,1	14,7	11,5
20 - 500	18,4	15,1	11,8
20 - 600	18,8	15,4	12,0
20 - 700	19,1	15,9	12,4
20 - 800	19,4	16,3	12,9
20 - 900	19,4	16,7	13,4
20 - 1000	19,7	17,1	14,0
20 - 1100	20	17,5	-

8.4.2 Měrné teplo

Měrné teplo korozivzdorné oceli c lze určit následovně:

Pro austenitické a austeniticko-feritické oceli:

$$c = 450 + 0,28 \times \theta - 2,91 \times 10^{-4}\theta^2 + 1,34 \times 10^{-7}\theta^3 \quad \text{J/kg}^\circ\text{C} \quad (8.37)$$

Pro feritické korozivzdorné oceli:

$$c = 430 + 0,26 \times \theta \quad \text{J/kg}^\circ\text{C} \quad (8.38)$$

EN 1993-1-2 v současnosti uvádí pouze rovnici (8.37). Předpokládá se, že rovnice (8.38) bude zavedena v další revizi normy EN 1993-1-2.

8.4.3 Tepelná vodivost

Tepelnou vodivost korozivzdorné oceli λ lze stanovit následovně:

Pro austenitické a austeniticko-feritické oceli:

$$\lambda = 14,6 + 1,27 \times 10^{-2}\theta \quad \text{W/m}^\circ\text{C} \quad (8.39)$$

Pro feritické korozivzdorné oceli:

$$\lambda = 20,4 + 2,28 \times 10^{-2}\theta - 1,54 \times 10^{-5}\theta^2 \quad \text{W/m}^\circ\text{C} \quad (8.40)$$

EN 1993-1-2 v současnosti uvádí pouze rovnici (8.39). Předpokládá se, že rovnice (8.40) bude zavedena v další revizi normy EN 1993-1-2.

8.4.4 Výpočet vývoje teploty v korozivzdorné oceli

Způsob výpočtu vývoje teploty pro uhlíkové oceli je možné použít i pro oceli korozivzdorné.

Pro rovnoměrné rozložení teploty v průřezu se má přírůstek teploty v nechráněném prvku v časovém intervalu Δt určit z výrazu:

$$\Delta\theta_t = \frac{A_m/V}{c \rho} \dot{h}_{\text{net,d}} \Delta t \quad (8.41)$$

kde:

- c je měrné teplo korozivzdorné oceli, (J/kgK) (viz část 8.4.2);
- ρ je hustota korozivzdorné oceli (kg/m³) daná tabulkou 2.7 (běžně uvažovaná jako nezávislá na teplotě);

A_m/V součinitel průřezu nechráněných ocelových prvků;

A_m je plocha vystaveného povrchu na jednotku délky;

V je objem prvku na jednotku délky;

$\dot{h}_{\text{net,d}}$ návrhová hodnota tepelné pohltivosti na jednotku plochy daná součtem

$$= \dot{h}_{\text{net,c}} + \dot{h}_{\text{net,r}} \quad (8.42)$$

ve kterém:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c (\theta_g - \theta) \quad (8.43)$$

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \phi \varepsilon_{\text{res}} 5,67 \times 10^{-8} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta + 273)^4] \quad (8.44)$$

α_c je součinitel přestupu tepla prouděním (běžně uvažován jako 25 W/m²K);

θ_g je teplota plynů v blízkosti prvku vystaveného účinkům požáru (°C), daná nominální teplotní křivkou;

θ je teplota ocelového prvku, která se uvažuje rovnoměrná v čase t (°C);

ϕ je polohový faktor;

ε_{res} je výsledná emisivita.

Parametr ε_{res} reprezentuje sálání přenesené mezi požárem a povrchem korozivzdorné oceli a jeho velikost závisí na míře přímého vystavení prvků požáru. Prvky, které jsou částečně stíněny vlivu sálání, budou mít menší hodnotu ε_{res} . Pro korozivzdorné oceli udává EN 1993-1-2 hodnotu $\varepsilon_{\text{res}} = 0,4$.

Výše uvedený vztah pro přírůstek teploty v časovém intervalu se může použít pro stanovení teploty v ocelovém prvku pomocí součtu jednotlivých přírůstků v časových intervalech za předpokladu znalosti průběhu teploty požáru. Nominální normová požární křivka je v EN 1991-1-2 dána vztahem:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (8.45)$$

kde:

t je čas trvání požáru (minuty).

8.5 Materiálový model při zvýšené teplotě

Pracovní diagram při zvýšené teplotě může být stanoven na základě následujícího, níže uvedeného vztahu. Příloha C uvádí obdobný vztah pro materiálový model při běžné teplotě.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_{\theta}} + 0,002 \left[\frac{\sigma}{f_{p0,2,\theta}} \right]^{n_{\theta}} \quad \text{pro } \sigma \leq f_{p0,2,\theta} \quad (8.46)$$

Druhá část pracovního diagramu může být vyjádřena v závislosti na $f_{2,\theta}$ (rovnice (8.47)) nebo $f_{u,\theta}$ (rovnice (8.48)):

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + \left(0,02 - \varepsilon_{p0,2,\theta} - \frac{(f_{2,\theta} - f_{p0,2,\theta})}{E_{p0,2,\theta}} \right) \times \left[\frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{f_{2,\theta} - f_{p0,2,\theta}} \right]^{m_{\theta,2}} + \varepsilon_{p0,2,\theta} \quad \text{pro } f_{p0,2,\theta} < \sigma \leq f_{u,\theta} \quad (8.47)$$

nebo

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + \varepsilon_{u,\theta} \left(\frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0,2,\theta}} \right)^{m_{\theta}} + \varepsilon_{p0,2,\theta} \quad \text{pro } f_{p0,2,\theta} < \sigma \leq f_{u,\theta} \quad (8.48)$$

kde:

σ je tzv. inženýrské napětí;

ε je tzv. inženýrské poměrné přetvoření;

$f_{2,\theta}$ je napětí při 2% poměrném přetvoření při teplotě θ ;

$\varepsilon_{p0,2,\theta}$ je celkové poměrné přetvoření odpovídající dosažení $f_{p0,2,\theta}$;

$E_{p0,2,\theta}$ je tečný modul pružnosti odpovídající $f_{p0,2,\theta}$;

$\varepsilon_{u,\theta}$ je poměrné přetvoření při dosažení meze pevnosti $f_{u,\theta}$ ($\varepsilon_{u,\theta} \leq \varepsilon_u$);

n_{θ} , m_{θ} a $m_{\theta,2}$ jsou exponenty definující míru nelinearity pracovního diagramu při teplotě θ ;

$\varepsilon_{u,\theta}$ může být stanoveno ze vztahu pro pracovní diagram při běžné teplotě ε_u uvedeného v Příloze C s dosazením hodnot pevnostních charakteristik za zvýšené teploty.

Hodnoty n_{θ} mohou být uvažovány hodnotami při běžné teplotě n . Hodnoty m_{θ} a $m_{\theta,2}$ mohou být stanoveny vztahy pro m používanými za běžné teploty, s tím rozdílem, že se ve výpočtu použijí pevnosti při zvýšené teplotě $f_{p0,2,\theta}$ a $f_{u,\theta}$.

EN 1993-1-2 v současnosti uvádí odlišný materiálový model pro korozivzdorné oceli. Nicméně pro revizi normy EN 1993-1-2 se předpokládá zavedení modelu uvedeného v rovnicích (8.46), (8.47) a (8.48), který je jako modifikovaný vícestupňový Ramberg-Osgoodův model v souladu s široce uznávanou definicí používanou za běžné teploty (Příloha C). Tento nový materiálový model je rovněž výstižnější, méně složitý a založený na parametrech s jasným fyzikálním významem.

9 ÚNAVA

U konstrukcí nebo částech konstrukcí vystaveným vysokým úrovním cyklického namáhání, je nutné věnovat pozornost možnému porušení materiálu únavou. Posouzení únavy se obvykle u konstrukcí nevyžaduje, s výjimkou prvků podporujících zdvihací zařízení, vibrační zatížení, zatížení při válcování a prvkům vystaveným kmitání vyvolaným působení větru.

Stejně jako u konstrukcí z uhlíkové oceli vede kombinace koncentrovaného napětí a poruch ve svarových spojích k tomu, že tato místa jsou téměř vždy náchylnější k únavovému selhání než jiné části konstrukce. Pokyny pro stanovení únavové pevnosti konstrukcí z uhlíkové oceli platí i pro konstrukce z ocelí austenitických a austeniticko-feritických (viz EN 1993-1-9).

Vhodnou volbou tvaru konstrukce a konstrukčních detailů, které jsou odolné vůči únavě, je možné výrazně snížit náchylnost celé konstrukce na únavu. Klíčem k návrhu konstrukce odolné na únavu je uvažování možného vlivu únavy již na počátku návrhu. Posouzení konstrukce na únavu se provádí až po splnění ostatních návrhových kritérií. Opatření zavedená kvůli splnění požadavků na únavu mohou mít za následek, že konstrukce bude nevhodná nebo vysoce nákladná. Důležité je také uvažovat potřeby výrobce a montážní firmy. Proto se doporučuje, aby s nimi proběhla včasná konzultace s cílem poukázat na oblasti konstrukce, které jsou nejvíce citlivé na únavu, prodiskutovat možná opatření a uvědomit si problémy které mohou nastat během výroby a montáže. Při posouzení na únavu by se také měly zohlednit případné otvory nebo montážní připojení pro usnadnění výroby nebo výstavby.

Případné problémy s únavou mohou být částečně odstraněny vhodnou volbou konstrukčních detailů a vyvarování se následných faktorů:

- Náhlé změny průřezu a koncentrace napětí;
- Úkoso a excentricity;
- Povrchové vady materiálu (vrypy, rýhy, atd.);
- Nadbytečné svařování pomocných prvků, například zdvihací oka;
- Svary s částečným průvarem, koutové svary, přerušované svary a podložky;
- Dotek elektrody mimo oblast svařování.

Ačkoli vylepšení svaru pomocí technologií, jako je kontrola profilu svaru, zabrušování svarů, brokování a oklepání strusky, může zvýšit únavovou pevnost spoje, není k dispozici dostatečné množství dat ke stanovení možných přínosů pro konstrukce z korozivzdorných ocelí. Tyto technologie jsou navíc velice náročné a složité, tudíž aby bylo dosaženo maximálního přínosu, vyžadují kvalifikovaného odborníka s dostatkem zkušeností. Neměly by být, vyjma zvláštních případů, být uvažovány jako jedna možností návrhu.

10 ZKOUŠKY

10.1 Obecné informace

Zkoušení materiálů a prvků z korozivzdorné oceli může být zapotřebí z mnoha důvodů:

- Je-li potřeba uvažovat zvýšenou pevnost rohů za studena tvarovaných prutů (viz část 2.2.1);
- Je-li geometrie prutu taková, že se vymyká stanoveným limitům (viz část 5.2);
- Mají-li být konstrukce nebo části konstrukce navrženy na základě vyzkoušení prototypu;
- Je-li vyžadováno potvrzení konzistence výroby.

Obvyklá opatření a požadavky na provedení zkoušky a její následné vyhodnocení pro uhlíkové oceli platí také pro zkoušení korozivzdorných ocelí. Proto se doporučuje, aby byl brán ohled na požadavky uvedené v části 5.2 a příloze D normy EN 1990, a kapitole 9 a příloze A normy EN 1993-1-3. Existují však určité aspekty chování korozivzdorné oceli, kterým je třeba věnovat větší pozornost než v případě uhlíkové oceli. Jejich stručné shrnutí je uvedeno níže.

10.2 Stanovení křivky pracovního diagram

Při provádění tahových zkoušek vzorků z korozivzdorné oceli se doporučuje, aby zatížení bylo aplikováno pomocí čepů procházejících konci vzorku, které mají dostatečnou plochu pro přenesení smykového namáhání. Tím je zajištěno, že je vzorek namáhán pouze osovým tahem, což umožňuje stanovení skutečného tvaru křivky pracovního diagramu, aniž by hrozilo zkreslení předčasným protažením v důsledku excentricity zatížení. To, že zatížení působí osově, může být potvrzeno pružnými testy s extenzometrem umístěným v různých orientacích na vzorku. Jelikož korozivzdorná ocel vykazuje známky anizotropie (rozdílné vlastnosti v rovnoběžném a příčném směru vzhledem ke směru válcování), s vyšší pevností kolmo na směr válcování, je nutné věnovat patřičnou pozornost orientaci zkušebního vzorku. Vlastnosti korozivzdorné oceli jsou silně závislé na rychlosti deformace; doporučuje se použít stejnou rychlost nárůstu deformace, jako použil výrobce pro stanovení certifikovaných vlastností.

10.3 Zkoušky prutů

Doporučuje se, aby zkoušené pruty byly úplně nebo převážně stejné, v závislosti na možnostech zkušebny, a stejně vyrobené jako jsou uvažovány na plánované konstrukci. Pokud jsou jejich části svařované, zkoušený vzorek musí být svařen stejným způsobem.

Vzhledem k anizotropii materiálu se doporučuje, aby byly vzorky z plechů nebo desek orientovány stejně (tj. příčně nebo rovnoběžně ke směru válcování) jako v plánované konstrukci. V případě, že výsledná orientace není známa nebo nemůže být zaručena, je nutné provést zkoušky pro oba směry a uvažovat méně příznivé výsledky. U tvrzených materiálů by měla být provedena jak tahová, tak tlaková zkouška v příslušném směru. Výsledkem vyhodnocení provedených zkoušek by měla být příslušná referenční pevnost materiálu.

Korozivzdorná ocel vykazuje vyšší tažnost a větší zpevnění než uhlíková ocel, proto je nutné, aby zkušební zařízení mělo větší kapacity, než je požadováno pro uhlíkovou ocel o stejné hodnotě meze kluzu. Nemyslí se pouze větší maximální síla, ale také umožnění větší deformace vzorku.

Je třeba poznamenat, že při vyšších hodnotách zatížení vzorku se projeví tečení materiálu, při kterém se může stát, že odečítání hodnoty deformace nebude v rozumném čase zcela ustálené.

11 HLEDISKA VÝROBY

11.1 Úvod

Účelem této části je upozornit projektanta na příslušná hlediska výroby při použití korozivzdorných ocelí, včetně doporučení osvědčených metod. To rovněž zahrnuje předběžný výběr vhodného výrobce, který má práci provést.

Korozivzdorné oceli nejsou materiálem, kde je výroba složitá. Nicméně v některých ohledech je výroba odlišná od výroby používané pro uhlíkové oceli a tyto ohledy by měly být náležitě zohledněny. Mnoho výrobních a spojovacích postupů je podobných těm, používaných u uhlíkových ocelí, ale odlišné vlastnosti korozivzdorných ocelí vyžadují v řadě oblastí zvláštní ohled. Je důležité, aby docházelo k vzájemné komunikaci projektanta a výrobce již na začátku projektu, aby bylo zajištěno, že mohou a budou použity příslušné výrobní postupy.

Prvořadým hlediskem je zachování korozní odolnosti oceli. Je proto nezbytné provést taková opatření ve všech fázích skladování, manipulace a výroby aby nebylo ohroženo vytvoření sebeobnovující pasivní povrchové vrstvy. Zvláštní péče musí být věnována plnému obnovení korozní odolnosti v oblasti svařování. Přestože jsou taková opatření zásadní, jsou rovněž jednoduchá a jsou obecně součástí zavedených inženýrských postupů.

Během výroby je důležité zachovat dobrý vzhled povrchu korozivzdorné oceli. Případné povrchové vady jsou nejen nevhodné, ale obvykle též nepřijatelné a jejich odstranění je časově i finančně nákladné. Zatímco u uhlíkových ocelí je případná vada běžně zakryta nátěrem, u konstrukcí z korozivzdorných ocelí je takový případ velmi ojedinělý.

Podoba ocelového výrobku může být závislá na dostupnosti materiálu. Je třeba zmínit, že sortiment dostupných za tepla válcovaných profilů je pro korozivzdorné oceli proti sortimentu dostupnému pro uhlíkové oceli značně omezený. To vede k většímu používání za studena tvářených a svařovaných prvků než je běžná praxe u uhlíkových ocelí. Také je třeba s ohledem na možnosti menších výrobních délek u lisovaných profilů použití častějších montážních přípojí v konstrukcích. V návrhu detailu je třeba uvážit vhodnou vzdálenost šroubů od zakřivení rohu a možný montážní problém vyplývající z distorzí po svařování.

11.2 EN 1090 *Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí*

Výroba a montáž konstrukcí z korozivzdorných ocelí musí být provedena v souladu s normou EN 1090, která je harmonizovanou normou. Konstrukční výrobky vyrobené v souladu s EN 1090 jsou opatřeny certifikátem CE pro použití v Evropském hospodářském prostoru. EN 1090 zahrnuje za tepla zhotovené výrobky z austenitických, austeniticko-feritických a feritických ocelí.

Část 1 normy EN 1090 jsou *Požadavky na posouzení shody nosných stavebních dílců ocelových konstrukcí*. Tato část popisuje, jak mohou výrobci prokázat, že jimi vyrobené nosné stavební dílce splňují deklarované vlastnosti (konstrukční vlastnosti, díky kterým vyhovují jejich konkrétnímu použití a funkci).

Část 2 normy EN 1090 jsou *Technické požadavky na ocelové konstrukce*. Tato část specifikuje požadavky na montáž ocelové konstrukce při zajištění adekvátní úrovně mechanické odolnosti a stability, použitelnosti a trvanlivosti. Stanovuje

charakteristiky pro dílce, které musí být splněny a deklarovány jeho výrobcem na základě požadavků Části 1. To zahrnuje širokou škálu technických požadavků na konstrukce z uhlíkových i korozivzdorných ocelí, a týká se jak za tepla válcovaných, tak za studena tvářených výrobků. Vše je použitelné pro nosné stavební dílce budov a dalších podobných konstrukcí.

11.3 Třída provedení

Třída provedení musí být stanovena v souladu s normativní Přílohou C normy EN 1993-1-1. Jsou čtyři třídy provedení jako EXC4 (nejvyšší požadavek přísnosti) až EXC1 (nejnižší požadavek přísnosti). Hlavním důvodem nutnosti výběru třídy provedení je, aby byla dosažena spolehlivost dokončené ocelové konstrukce proti jejímu selhání, která odpovídá jak následkům selhání konstrukce, prvku nebo detailu, tak požadavkům montáže. Každá třída se vztahuje k souboru požadavků na výrobu a montáž na stavbě, které jsou dány v Příloze A.3 normy EN 1090-2. Třída provedení pro dodavatele ocelové konstrukce znamená použití určitých kontrol výrobních procesů, které vytvářejí část certifikovaného Systému řízení výroby (SŘV, anglicky Factory Production Control – FPC) jako jedné z podmínek pro používání značky CE pro výrobky z oceli. To také způsobuje rozdělení výrobců obecně do výrobních firem s jedním ze čtyř procesů kontroly. Ty omezují jednotlivé výrobce v tom, jaké konstrukce mohou zhotovovat, např. firma s certifikovaným Systémem řízení výroby pro EXC2 může vyrábět pouze konstrukce tříd provedení EXC 1 a 2. Zákazníci, zadavatelé a hlavní dodavatelé tak mohou využít třídy provedení pro výběr dodavatele s odpovídající úrovní kvality a zajištění kontroly. Třída provedení je rovněž používána projektanty/zadavateli ke stanovení odpovídající úrovně kvality a zajištění kontroly požadované během výroby pro zajištění předpokladů jejich návrhu.

Třída provedení je stanovena pro práce jako celek, jednotlivý dílec a detail dílce. V některých případech bude výrobní třída pro konstrukci, dílec a detail shodná, zatímco v jiných případech se požadovaná třída provedení pro jednotlivé dílce a detaily může lišit od třídy použitelné pro konstrukci obecně.

Rozhodující činitele pro výběr třídy provedení jsou:

- Požadovaná spolehlivost (založena buď na požadované třídě následků nebo třídě spolehlivosti nebo obojím, jak je definováno v EN 1990);
- Typ konstrukce, dílce nebo detailu;
- Typ zatížení, na jaké je konstrukce, dílec nebo detail navržen (statické, kvazistatické, únavové nebo seizmické).

Přestože každý objekt musí být posouzen na základě jeho požadavků, výrobní třída 2 (EXC2) bude odpovídat většině objektů postavených mimo seizmické oblasti. EXC4 má být použita pro konstrukce s extrémními následky při porušení. Postup pro výběr výrobní třídy uvádí Národní příloha normy EN 1993-1-1.

Nadhodnocení třídy provedení je pokud možno třeba se vyhnout a zabránit tak zbytečným nákladům. Například, EXC2 může být třída provedení stanovená pro projekt, ve kterém je ale zároveň potřeba zajistit plnou sledovatelnost (která je požadavkem třídy provedení EXC3), přičemž EXC2 vyžaduje pouze částečnou sledovatelnost. V takovém případě je doporučeno místo stanovení EXC3 kvůli splnění této jedné podmínky použít třídu EXC2 ale s podmínkou plné sledovatelnosti přidané do specifikace projektu.

11.4 Skladování a manipulace

V porovnání s uhlíkovou ocelí je obecně u korozi-vzdorné oceli potřeba větší opatrnosti při skladování a manipulaci pro zabránění poškození povrchu (zvláště pro světlé vyžíhané nebo leštěné povrchy). Je rovněž nezbytné zabránit kontaminaci povrchu uhlíkovou ocelí a železem, která by měla za následek vyšší možnost vzniku povrchové koroze. Postupy skladování a manipulace by měly být odsouhlaseny mezi příslušnými smluvními stranami v předstihu před jakoukoliv výrobou a tak detailně, aby bylo možné zohlednit jakékoliv zvláštní požadavky. Postupy by měly zohlednit například následující body:

- Ocel má být zkontrolována bezprostředně po doručení pro jakékoliv vady povrchu;
- Ocel může být opatřena umělým nebo jiným obalem. Ten má být ponechán tak dlouho, jak je to možné, a odstraněn až před finální výrobou. Ochranný obal, pokud je požadován (např. pro světlé vyžíhané povrchy), má být specifikován v dokumentaci odběratele;
- Pokud je použito umělých lepicích folií místo obalových umělých fólií, musí tyto umělé fólie vykazovat odolnost vůči UV, aby bylo zabráněno jejich předčasné degradaci a kontaminaci povrchu zbytky lepidla. Navíc musí být sledována životnost lepicí fólie, která má být odstraněna v průběhu životnosti udávané výrobcem, ta je zpravidla do 6 měsíců;
- Skladování v solí zatížených vlhkých prostředích má být zabráněno. Pokud tomu nelze zabránit, obal má zabránit pronikání solí. Obalové fólie by neměly být v případech předpokládaného vystavení povrchu solím používány, neboť jsou propustné jak solím tak vlhkosti a vytváří tak ideální podmínky pro vznik šterbinové koroze;
- Skladovací regály nemají mít třecí plochy uhlíkové oceli a mají být proto ochráněny dřevěnými, gumovými nebo plastovými latěmi či deskami. Plechy mají být skladovány nejlépe ve svislé poloze. Vodorovně skladované plechy mohou být vystaveny kontaminaci železem a poškození povrchu;
- Vázací prostředky, např. řetězy, háky a úchytky, z uhlíkové oceli nemají být používány. K zabránění kontaminaci železem je opět možné použití izolačních materiálů nebo přísavek. Vidle vysokozdvíhových vozíků by měly být rovněž opatřena ochranou;
- Má být zabráněno kontaktu s chemikáliemi zahrnující kyseliny, zásadité přípravky, oleje a maziva (která mohou způsobit skvrny povrchu u některých povrchových úprav);
- Ideálně mají být výrobní prostory pro uhlíkové a korozi-vzdorné oceli oddělené. Používáno má být pouze nářadí určené výhradně pro korozi-vzdorné oceli (to se týká zejména brusných kotoučů a drátěných kartáčů). Je třeba poukázat na to, že drátěné kartáče a drátěnky mají být z korozi-vzdorné oceli a obecně z třídy oceli, která je odpovídající korozní odolnosti (např. nepoužívá se drátěných kartáčů z feritických nebo méně legovaných austenitických ocelí na ocel s vyšší korozní odolností);
- Jako prevence během výroby a montáže, je doporučeno zajistit, že jakékoliv ostré otřepy vzniklé stříháním jsou odstraněny;
- Mají být zváženy všechny požadavky potřebné pro ochranu dokončených výrobků během přepravy.

Návod pro odstranění znečištění je obsažen v normě ASTM A380.

11.5 Obráběcí procesy a tváření

Austenitické oceli výrazně zvyšují vlivem deformačního zpevnění za studena svoji pevnost. Tváření za studena s nárůstem pevnosti při zpracování může být jak výhodné, umožňující vysokou míru plastického přetvoření při tváření bez rizika předčasného porušení, tak nevýhodné, zejména v nutnosti zvláštního ohledu na požadavky při strojním obrábění a jeho rychlosti. Míra zvýšení pevnosti se liší mezi jednotlivými třídami oceli, např. pro třídu 1.4318 je nárůst pevnosti až při vyšší míře přetvoření než u ostatních tříd používaných pro ocelové konstrukce. Při válcování je jednodušší dosáhnout rovinnosti u feritických korozivzdorných ocelí než u austenitických korozivzdorných ocelí.

11.5.1 Dělení

Korozivzdorná ocel je při porovnání s dalšími kovy poměrně drahý materiál a je proto potřebné pečlivé rozvržení řezu plechů pro zamezení plýtvání při řezání. Větší množství odpadu se může vyplývat při použití materiálu s leštěným vzorem (nebo jednosměrným vzorem), který musí být zachován při výrobě. Některá značkovácí pera/křídla budou obtížně odstranitelná nebo způsobí skvrny, pokud budou použita přímo na povrch (místo použití na ochrannou fólii). Všechny značkovače mají být před jejich použitím vyzkoušeny, stejně tak jako rozpouštědla použitá pro jejich odstranění.

Korozivzdorné oceli mohou být děleny pomocí běžných způsobů, jako je např. stříhání a řezání pilou, ale potřebný výkon bude vyšší než pro uhlíkové oceli podobných tloušťek s ohledem na zpevnění materiálu. Pokud je to možné, dělení (a strojní obrábění obecně) má být provedeno pro materiál ve vyžádaném stavu (nižší pevnosti) a omezit tak zpevnění materiálu a opotřebení nástrojů.

Řezání plasmou je zvláště vhodné pro řezání plechů a profilů velkých tloušťek až do 125 mm a tam, kde jsou řezné hrany následně opracovávány, např. pro přípravu svarů. Řezání vodním paprskem je přiměřené pro řezání materiálu tloušťky do 200 mm, bez zahřívání, zkroucení nebo změn vlastností korozivzdorné oceli. Řezání laserem je pro korozivzdorné oceli vhodné, zejména pokud jsou požadovány malé tolerance, nebo pro řezání nelineárních tvarů a vzorů: je možné dosáhnout dobré kvality řezných hran s nízkým rizikem zkroucení oceli. Pro dělení rovnými liniemi se běžně používá gilotinových nůžek. Nůžkami s jedním volným koncem lze dělit i materiál větší šířky, než je šířka břitu nůžek, byť s rizikem vytvoření malých zubů na linii dělení. Řezání kyslíko-acetylenovým plamenem není vhodné pro dělení korozivzdorné oceli, leda při použití postupu s přidáním tavidla.

11.5.2 Tváření za studena

Korozivzdorná ocel je snadno tvarovatelná pomocí běžných technik tváření za studena jako je ohýbání, kovotlačení (technologie rotačního tlačení plechu), lisování nebo tažení. Pro konstrukční použití je nejběžnějším způsobem tváření ohýbání na lisu, nicméně pro větší objemy tenkostěnných profilů může být ekonomičtějším způsobem válcování.

Opět, požadavky na výkon pro ohýbání korozivzdorných ocelí budou vyšší než pro ohýbání uhlíkových ocelí kvůli deformačnímu zpevnění materiálu (okolo 50 % v případě austenitických ocelí nebo i více u austeniticko-feritických ocelí). Rovněž je třeba korozivzdornou ocel ohnout o větší úhel než je tomu u běžně používaných uhlíkových ocelí pro tváření za studena, aby byl pokryt vliv zpětného odpružení materiálu. U feritických ocelí není tak vysoká míra zpevnění materiálu při tváření za studena. U složitých průřezů je žádoucí zapojit výrobce do procesu návrhu co nejdříve je to možné.

Vysoká tažnost korozivzdorných ocelí umožňuje vytvoření rohů malých poloměrů, dokonce až do poloviny tloušťky vyžíhaného materiálu. Nicméně je obecně vhodné používat následující minima vnitřních poloměrů:

t pro austenitické třídy;

$2t$ pro austeniticko-feritické třídy.

kde t je tloušťka materiálu.

Stejně jako u uhlíkových ocelí, tváření za studena může vést ke snížení houževnatosti korozivzdorné oceli. Pokud je houževnatost kritickým požadavkem, projektant musí uvážit vliv procesu tváření za studena na houževnatost materiálu, např. provedením zkoušek na vzorcích plechu. Redukce houževnatosti austenitických tříd vlivem tváření za studena nebude významná.

Při výrobě kruhových trubek ohýbáním plechu mají být splněna následující kritéria:

- Poměr vnějšího průměru trubky k tloušťce stěny d/t nemá překročit 15 (aby nebyly nutné drahé nástroje);
- Poloměr zahnutí (vztažení ke středu stěny trubky) nemá být nižší než vyšší z hodnot $1,5d$ nebo $d + 100$ mm;
- Jakýkoliv svar má být umístěn blízko neutrální osy, aby bylo sníženo ohybové napětí ve svaru.

Pro specifikaci vyšších poměrů d/t nebo nižšího poloměru zakřivení, by mělo být vyhledáno odborné rady specialisty dodavatele. Alternativně by měly být provedeny předvýrobní zkoušky k ujištění se, že zakřivení nezpůsobuje mechanické poškození a výrobní tolerance jsou akceptovatelné. Pro trubky s průměrem $d < 100$ mm může být použit méně přísný požadavek na poloměr zahnutí, např. vnitřní poloměr nemá být menší než $2,5d$. Ještě poznamenejme, že důsledek zakřivení na únosnost s vlivem boulení může být pro projektanta důležitý a bude ho třeba zahrnout.

11.5.3 Otvory

Otvory mohou být vrtány, proráženy nebo řezány laserem. Při obrábění se musí použít pozitivní geometrie břitu s ohledem na mechanické zpevnění, což u vrtání vyžaduje ostřejší geometrii úhlu čela vrtáku a také správnou rychlost. Použití důlčků se zaobleným hrotem se nedoporučuje, neboť to vede ke zpevnění povrchu. Má se použít středící vrták; pokud je potřeba použít důlčík, měl by být s trojúhelníkovým ostrým hrotem. Prorážení otvorů je možné u austenitických ocelí do tlouštěk zhruba 20 mm. Vyšší pevnosti austeniticko-feritických ocelí vedou k většímu omezení tloušťky materiálu. Nejmenší průměr otvoru, který může být proražen, je o 2 mm větší než tloušťka plechu.

11.6 Svařování

11.6.1 Úvod

Příslušná norma pro svařování korozivzdorných ocelí je EN 1011-3 *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí*. Níže uvedená část je stručným úvodem do svařování korozivzdorné oceli.

Austenitické oceli jsou obecně snadno svařovány pomocí běžných způsobů, pouze s použitím vhodného svařovacího materiálu. Austeniticko-feritické oceli vyžadují

větší kontrolu minimálního a maximálního tepelného příkonu během svařování a mohou vyžadovat teplené zpracování po svaření nebo zvláštní svařovací materiál.

Obecně je pro dobrou kvalitu svarů důležitá čistota a absence znečištění. Oleje nebo jiné uhlovodíky, špína a jiný odpad, ochranné folie a značky pastely mají být odstraněny, aby bylo zabráněno jejich rozložení s rizikem získání uhlíku a kontaminaci povrchu svaru. Svar má být bez obsahu zinku, včetně získaného z pozinkovaných výrobků, a bez mědi a jejich slitin. (Je třeba zvláštní péče při použití měděných podložek kořene svaru; pak musí být proveden úkos v podložce přiléhající k oblasti natavení.)

U korozivzdorných ocelí je důležitější než u ocelí uhlíkových omezit místa, kde může dojít k iniciaci štěrbinové koroze (viz část 3.2.2). Svarové vady jako je zápal, nedostatečná penetrace, rozstřík svaru, struska a doteky elektrodou mimo svarovou plochu jsou všechno potenciálně náchylná místa a mají být proto minimalizována. Doteky elektrodou mimo svarovou plochu nebo nedostatečný kontakt uzemňovací svorky navíc poškozují pasivní povrchovou vrstvu a mohou dát vzniknout štěrbinové korozi, tedy zničit vzhled výrobku.

Kde je vzhled svaru důležitý, měl by inženýr specifikovat požadované podmínky na svařený profil a povrch. To může ovlivnit výběr metody svařování nebo úpravy po svařování. Zváženo by mělo být i místo svaru. Je v tomto místě možné provést úpravu po svařování?

Inženýr by měl mít na vědomí, že deformace po svařování jsou obecně vyšší pro korozivzdorné oceli než pro oceli uhlíkové (viz část 11.6.4). Tepelný příkon a interpass (mezihousenkovou) teplotu je potřeba kontrolovat, aby byly deformace minimalizovány a bylo zabráněno případným metalurgickým problémům (viz část 11.6.5).

Svařování má být provedeno kvalifikovaným postupem svařování za použití kvalifikované specifikace postupu svařování (WPS) v souladu s odpovídající částí norem EN ISO 15609, EN ISO 14555 nebo EN ISO 15620. Svářeči mají být kvalifikováni v souladu s EN ISO 14732. EN 1090-2 udává stupeň technických znalostí pro personál koordinace svařování, který závisí na třídě provedení, druhu korozivzdorné oceli a tloušťce materiálu, který má být svařován.

Postup svařování obsahuje následující součásti:

- Ověření metody svařování s pomocí naplánování postupu a požadavků zkoušení postupů svařování;
- Svářečskou kvalifikaci;
- Kontrolu operací během přípravy, samotného svařování a ošetření po svařování;
- Stupeň kontroly a nedestruktivní způsoby zkoušení, které budou použity;
- Kritéria pro přijatelný stupeň defektů svaru.

Pojistné svařování matice ke šroubu by nemělo být nikdy dovoleno, jelikož tyto materiály jsou vyvinuty pro jejich vysokou pevnost a nikoliv pro tavné svařování. Narušení závitu šroubu (tj. vytvoření širších závitů v jejich konci) může být přijatelnou alternativou v situaci, kdy matice musí být zajištěny na svém místě.

11.6.2 Metody svařování

Jak bylo zmíněno výše, pro korozivzdorné oceli je možné použít běžných metod tavného svařování. Tabulka 11.1 ukazuje vhodnost různých metod pro rozsahy tloušťek apod.

Tabulka 11.1 Metody svařování a jejich vhodnost

Metoda svařování (EN ISO 4063)	Vhodná forma výrobku	Typy svar. spoje	Rozsah tloušťek materiálu	Poloha svaru	Vhod. pro dílenské / na stavbě
111 Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (MMAW)	Vše vyjma plechů	Vše	3 mm ¹ nebo více	Vše	Vše
121/122 Svařování pod tavidlem (SAW)	Vše vyjma plechů	Vše	6 mm ¹ nebo více	V rovině	Vše
131 Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG)	Vše	Vše	2 mm ¹ nebo více	Vše	Vše ²
136 Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu (FCAW)	Vše	Vše	2 mm ¹ nebo více	Vše	Vše
141 Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (TIG)	Vše	Vše	Do cca 10 mm	Vše	Vše ²
2 Odporové svařování	Pouze plechy	Vše	Do cca 3 mm	Vše	Vše
521/522 Svařování laserem (LBW)	Vše	Vše	Závisí na průřezu, je možné až do 25 mm	Vše	Pouze dílenské

Poznámky:
¹ Záleží na typu svarového spoje.
² Více citlivá na počasí než další metody s vyšším požadavkem na ochranu prostředí než ostatní metody.

Předehřev austenitických a austeniticko-feritických ocelí se běžně neprovádí s výjimkou potřeby odpaření kondenzátu (vody) z povrchu.

Feritické oceli jsou náchylné k nárůstu zrna při teplotách nad 950 °C vedoucí k poklesu houževnatosti. K jeho zabránění má být teplený příkon svařování udržován nízký pomocí zachování malé svarové lázně a použitím vyšší rychlosti posuvu. S dobrou kontrolou tepelného příkonu mohou být provedeny houževnaté svary v tenkostěnných prvcích do 2 až 3 mm, kde je houževnatost lepší ve skutečnosti i s ohledem na absenci bránění deformaci tloušťkou prvku.

11.6.3 Svařovací materiály

Komerční svařovací materiály byly vyvinuty pro možnost svarů s ekvivalentní pevností a korozní odolností při porovnání se základním materiálem a pro minimalizaci rizika krystalizačních trhlin. Pro speciální aplikace jako je neobvykle vysoké korozní prostředí nebo při požadavku na nemagnetické vlastnosti, by mělo být vyhledáno odborné rady výrobce oceli a výrobce svařovacího materiálu. Všechny svařovací materiály mají splňovat požadavky specifikované v normě EN 1090-2. Je důležité, aby svařovací materiály nebyly vystaveny znečištění a byly skladovány dle instrukcí výrobce. Jakýkoliv svařovací materiál používající tavidlo (např. MMAW, FSAW, SAW) je náchylný na získávání vlhkosti ze vzduchu, což

může vést následně k porozitě svaru. Některé metody jako je TIG nebo svařování laserem nemusí používat přídavný kov.

Použití austenitických přídavných kovů pro svařování feritických ocelí vytváří svary s vyšší houževnatostí než při použití feritických přídavných kovů. Svařování feritických ocelí bez přídavného kovu je možné, ale může zapříčinit nižší korozní odolnost, tažnost a houževnatost a proto by mělo být použito jen s náležitou opatrností.

11.6.4 Svarové deformace

Stejně jako další kovy, korozivzdorná ocel vykazuje deformace vlivem svařování. Typy deformací (úhlová distorze, ohnutí, smrštění atd.) jsou podobné svou podstatou deformacím objevujícím se u konstrukcí z uhlíkových ocelí. Nicméně deformace korozivzdorných ocelí, obzvláště austenitických tříd, je větší než v případě uhlíkové oceli kvůli jejich vyšší tepelné roztažnosti a nižší tepelné vodivosti (která vede k prudším teplotním gradientům), viz část 2.4. Feritické oceli při zahřátí vykazují menší deformace než austenitické třídy. Deformace vlivem svařování u austeniticko-feritických ocelí jsou pak mezi těmi pro austenitické a feritické třídy.

Deformace vlivem svařování mohou být pouze regulovány, nikoliv eliminovány. Mohou být použita následující opatření:

Opatření provedená projektantem

- Zbavit se nutnosti svařování, například návrhem za tepla válcovaných průřezů, uzavřených průřezů nebo laserem svařovaných průřezů, pokud jsou dostupné (svařování laserem vede k menším deformacím po svařování);
- Snižet rozsah svařování;
- Redukovat příčný profil svaru. Například v silnostěnných průřezech předepsáním oboustranných V nebo U svarů místo jednostranných V svarů;
- Použitím symetrických přípojů;
- Navrhovat s uvažování většího místa pro tolerance.

Opatření provedená výrobcem

- Používat účinné upínací prostředky. Prostředky mají pokud možno obsahovat měděné nebo hliníkové pruty pro pomoc s odvodem tepla z oblasti svaru.
- Pokud není účinné použití upnutí možné, použijí se souměrně umístěné stehové svary v malých vzdálenostech;
- Ujistit se o dobrém sestavení a zarovnání před svařováním;
- Použít nejnižší tepelný příkon přiměřený vybrané svařovací metodě, materiálu a tloušťce;
- Použít vyrovnané svařování a odpovídající postup (např. postup vratným krokem).

11.6.5 Kritérium metalurgie

Není možné zde pokrýt metalurgii korozivzdorných ocelí s výjimkou některých významnějších kritérií.

Vytvoření precipitátů u austenitických tříd

U austenitických ocelí je tepelně ovlivněná oblast relativně odolná růstu zrna a precipitaci křehké a intermetalické fáze. Svařovací postupy jsou zpravidla navrženy tak, aby byl řízen čas strávený v rozmezí kritických teplot pro precipitaci (vysrážení)

karbidů (450 – 900 °C). Nadměrná oprava svarů zvyšuje tento čas a je proto zpravidla omezena na tři hlavní opravy.

Vytvoření precipitátů s vysokým obsahem chrómu a následující ztráta korozní odolnosti je diskutováno v části 3.2.6 *Mezikrystalová koroze* kde je poznamenáno, že tento typ koroze není běžně problém u nízkouhlíkových austenitických ocelí (tj. 1.4307 a 1.4404). Nicméně rozpad svaru se projevuje u svařovaných konstrukcí z tříd, které nemají nízký obsah uhlíku.

Krystalizační trhliny u austenitických tříd

Ke krystalizačním trhlinám nedochází, pokud struktura svaru obsahuje 5 % feritu nebo více. Výrobci oceli vyvažují složení a tepelné úpravy běžných austenitických tříd tak, aby byl zajištěn nízký nebo žádný obsah feritu u dodaného materiálu, ale aby bylo vytvořeno dostatečné množství feritu v autogenním svaru (tj. svaru, kde není přidán žádný svarový kov). Nicméně aby byla snížena možnost výskytu trhlin, je nutné rozumně minimalizovat teplený příkon, interpass (mezihousenkovou) teplotu a zdržení u autogenních svarů. V tlustších materiálech je přidán svarový kov a použití dobrého svařovacího materiálu opět zajistí vytvoření patřičného množství feritu. Běžně není nutné měřit přesný obsah vytvořeného feritu; vytvoření krystalizačních trhlin bude zabráněno vhodným postupem svařování a svařovacím materiálem.

Zkřehnutí austeniticko-feritických tříd

Austeniticko-feritické oceli jsou náchylné k stárnutí při 475 °C a křehnutí vylučováním tzv. σ -fáze. K stárnutí při 475 °C dochází, pokud je ocel ponechána nebo pomalu chlazena v přibližném intervalu teplot 550 °C až 400 °C a vede to k nárůstu pevnosti a tvrdosti za poklesu tažnosti a vrubové houževnatosti. Křehnutí vylučováním σ -fáze může nastat po dlouhém vystavení teplotě v rozmezí 565 °C až 900 °C, ale může nastat i v krátkém čase okolo hodiny a půl při přiměřených podmínkách (v závislosti na složení a termo-mechanickém stavu oceli). Dopad křehnutí vylučováním σ -fáze je nejvyšší při pokojové teplotě nebo teplotě nižší. Křehnutí vylučováním σ -fáze má nepříznivý vliv na korozní odolnost.

Stárnutí při 475 °C i křehnutí vylučováním σ -fáze může být adekvátně řízeno použitím adekvátních postupů svařování, přičemž maximální teplota interpass je běžně doporučena 200 °C. Zvláštní péče musí být uplatněna při svařování masivních průřezů.

Pro zamezení zkřehnutí musí být zabráněno dlouhodobému vystavení teplotám nad 300 °C.

11.6.6 Zpracování po svařování

Tepelné zpracování po svařování korozivzdorných ocelí je zřídka prováděno mimo výrobní prostory. V některých případech může být požadováno tepelné zpracování pro odstranění pnutí. Nicméně jakékoliv tepelné zpracování může být rizikem a vyžaduje odbornou radu specialisty.

Obecně je nezbytná úprava povrchu po svařování, jak bude uvedeno v následujících odstavcích, obzvláště pokud je použito svařování elektrickým obloukem. Je důležité stanovit požadované zpracování po svařování k zabránění překročení ceny a možné špatné služby během provozu. Povrchové úpravy běžně používané výrobci jsou shrnuty v části 11.8.

Běžně používaným způsobem pro ošetření svaru je kartáčování a broušení. Množství ošetření má být výrobcem minimalizováno. Mírné broušení s jemným kotoučem je

nejvhodnější, přílišný tlak při broušení může vést k zahřívání, které může redukovat korozní odolnost. Drátěné kartáče mají být vyrobeny z kompatibilní korozivzdorné oceli (viz část 11.4). Intenzivní broušení svarů může vést k inkrustaci povrchu nečistotami, což může opět způsobit korozi.

Je dobrým zvykem odstraňovat všechny stopy zbarvení povrchu způsobené ohřevem. Nicméně žluté zbarvení povrchu může být tolerováno u ocelí, jejichž korozní odolnost má dostatečnou rezervu v daném prostředí. Kde tomu tak není, nebo kde není zbarvení akceptovatelné s ohledem na vzhled, může být odstraněno mořením nebo tryskáním skleněných perli. Moření může být provedeno ponořením v koupeli (viz část 11.8) nebo použitím past v souladu s instrukcemi výrobce.

Perličkování povrchu svaru je výhodné zpracování po svaření. Vyvolává tlakové pnutí v povrchu, které zvyšuje odolnost vůči únavě, odolnost korozi pod napětím a vzhled. Nicméně perličkování nemůže být oprávněným důvodem ke změně posouzení na únavu.

Výrazné odebrání kovu při strojním zpracování povede k uvolňování pnutí a tedy deformaci svařeného výrobku. V případech, kdy deformace posléze nesplní potřebné tolerance, může být požadováno tepelné zpracování.

11.6.7 Kontrola svarů

Tabulka 11.2 porovnává metody kontroly a zkoušek svarů používané u korozivzdorných ocelí s metodami pro svary uhlíkové oceli.

Metody jsou použity tak, jak je nutné s ohledem na požadavky korozní odolnosti pro uvažované prostředí. Nicméně vizuální kontrola má být provedena během všech fází svařování, jelikož může zabránit mnoha problémům způsobujícím potíže při následném postupu výroby. Prohlídka povrchu je důležitější než pro uhlíkové oceli, jelikož je korozivzdorná ocel primárně použita pro odolávání korozi a dokonce i malý nedostatek povrchu může způsobit náchylnost materiálu ke korozi.

Tabulka 11.2 Způsoby kontroly svarů

NDT typ	Austenitická korozivzdorná ocel	Austeniticko-feritická korozivzdorná ocel	Feritická korozivzdorná ocel	Uhlíková ocel
Povrchová	Vizuální Kapilární	Vizuální Kapilární Magnet. prášková	Vizuální Kapilární Magnet. prášková	Vizuální Kapilární Magnet. prášková
Objemová	Radiografická (rentgenové, gama záření)	Radiografická (rentgenové, gama záření)	Radiografická (rentgenové, gama záření)	Radiografická (rentgenové, gama záření) Ultrazvuk

Magnetická prášková zkouška není možná pro austenitické oceli, jelikož jsou nemagnetické. Použití kontroly ultrazvukem je omezené kvůli problémům s její interpretací, nicméně může být použita pro základní materiál. Radiografie gama zářením není vhodná pro detekci trhlin nebo nedostatečného provaření u prvku z korozivzdorné oceli tloušťky menší než 10 mm.

11.7 Zadírání a otěr

Pokud jsou povrchy pod zatížením a ve vzájemném pohybu, může docházet k zadírání závitů šroubů nebo vzájemnému spojení lokální adhezí a porušení povrchu v kontaktu s korozivzdornou ocelí, hliníkem, titanem a dalšími slitinami, které

vytvářejí ochrannou oxidační vrstvu jako ochranu proti korozi. Může tak dojít k vzájemnému spojení nebo zadření. V případech, kde nebude provedena demontáž a povolení šroubů je nežádoucí, to může být výhodné.

V případech, kde je důležité snadné vyjmutí šroubů při opravách, je třeba se zadírání vyhnout. Tomuto problému je možné se vyhnout provedením několika preventivních kroků:

- Snížením rychlosti otáček při montáži;
- Ujistěním se, že závity jsou co nejhladší;
- Mazáním vnitřních nebo vnějších závitů produkty obsahujícími disulfid molybdenu, slídu, grafit nebo mastek, nebo vhodný patentovaný vosk (ale je třeba pečlivě zvážit vhodnost použití komerčních maziv pro zabránění zadírání);
- Použitím nestejných tříd korozivzdorné oceli (třídy, které se liší ve složení, průběhu deformačního zpevnění a tvrdostí). Například použití kombinací materiálu pro šroub a matici třídami A2-C2, A4-C4 nebo A2-A4 dle EN ISO 3506;
- V kritických případech použít patentované za studena zpracované korozivzdorné oceli pro jeden nebo oba povrchy v páru (např. S21800, také známou jako Nitronic 60) nebo použít tvrdou povrchovou úpravu.

Je doporučeno, aby byl materiál šroubu za studena tvářený a třídy pevnosti min. 70 (viz tabulka 2.6). Materiál šroubu by neměl být použit v měkkém stavu kvůli sklonům k zadírání. Možnost zadírání lze rovněž snížit použitím válcovaných místo řezaných závitů a vyhnutím se jemným závitům a malým vřím závitů.

11.8 Úpravy povrchu

Povrchová úprava korozivzdorných ocelí je důležitým návrhovým kritériem a měla by být jasně specifikována na základě architektonických a funkčních požadavků. Čím kvalitnější úprava, tím vyšší cena. Zde se vyplatí předchozí pečlivé plánování manipulace a svařování. Pokud je například svar trubky na trubku v zábradlí nebo balustrádě schovaný uvnitř stojky, povede to ke snížení ceny úprav povrchu a k lepšímu konečnému vzhledu zábradlí. Pokud je předepsáno leštění, broušení nebo úpravy povrchu jiné než tovární nebo otryskání, je obecně nejekonomičtější provést tyto úpravy před výrobou. Např. za tepla válcované úhelníky, U průřezy, trubky a plechy mohou být leštěny před tím, než jsou přivařeny nebo jinak spojeny s dalšími prvky.

Povrch oceli má být obnoven do svého korozně odolného stavu odstraněním všech okují a znečištění. Moření v lázni kyseliny uvolní všechny okuje s možností jejich následného očištění štětinovým kartáčem, nicméně může vést ke změně vzhledu povrchové úpravy na matnější nebo tlumený. Moření rovněž rozpustí všechny zapuštěné částičky železa nebo uhlíkové oceli, které se, pokud by nebyly odstraněny, mohou projevit jako rezavé tečky na povrchu korozivzdorné oceli.

Abrazivní úpravy jako je broušení, leštění a leštění měkkým kotoučem vedou k jednosměrně orientovaným povrchům a tak zahlazování svarů může být na pleších s běžným válcovaným povrchem obtížné. Může tak být potřebný určitý stupeň experimentování pro stanovení postupu pro získání vhodné úpravy povrchu. Obecně je pro svařování estetických prvků preferováno svařování laserem, neboť svar je méně viditelný.

Elektrické leštění produkuje jasný lesklý povrch podobný povrchu leštěnému měkkým kotoučem. Odstraňuje tenkou povrchovou vrstvu společně s drobnými povrchovými oxidy. Větší zoxidované části musí být pro zajištění jednotného vzhledu po elektrickém leštění odstraněny mořením nebo broušením. Pokud to dovolí velikost prvku, elektrické leštění je provedeno ponorem do nádrže obsahujícího elektrolyt a elektrické připojení. K selektivnímu odstranění zbarvení po svařování nebo leštění vybraných částí lze použít ruční jednotky. Jsou také jiné způsoby úprav povrchu (elektrolytické pokovování, leštění v bubnu, leptání, kolorování a černění povrchu) které se pro konstrukce z korozivzdorných ocelí použijí pouze vzácně a nejsou zde dále popsány.

Je třeba opět zmínit, že povrch zabudované oceli má být bez znečištění. Zvláštní pozornost je třeba věnovat možnému znečištění z práce na přilehlé uhlíkové oceli, zvláště brusným prachem nebo jiskrami při práci brusným materiálem. Ve smlouvě má být v takových případech buď předepsáno použití umělých ochranných fólií, nebo konečné čištění po kompletaci konstrukce.

Příloha A Korelace mezi značením korozivzdorných ocelí

Tabulka A.1 poskytuje korelace mezi EN 10088 a americkým (US) značením.

Tabulka A.1 Značení korozivzdorné oceli – korelace mezi evropskými a americkými normami

Ocel podle EN 10088		US	
Číslo	Značka	ASTM	UNS
Austenitická			
1.4301	X5CrNi18-10	304	S30400
1.4306	X2CrNi19-11	304L	S30403
1.4307	X2CrNi18-9	304L	S30403
1.4311	X2CrNi18-10	304LN	S30453
1.4318	X2CrNi18-7	301LN	S30153
1.4401	X5CrNi Mo17-12-2	316	S31600
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	316L	S31603
1.4406	X2CrNiMoN17-11-2	316LN	S31653
1.4429	X2CrNiMoN17-13-3	316LN	S31653
1.4432	X2CrNiMo17-12-3	316L	S31603
1.4435	X2CrNiMo18-14-3	316L	-
1.4439	X2CrNiMoN17-13-5	317LMN	S31726
1.4529	X1NiCrMoCuN25-20-7	-	N08926
1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5	904 L	N08904
1.4541	X6CrNiTi18-10	321	S32100
1.4547	X1CrNiMoCuN20-18-7	-	S31254
1.4565	X2CrNiMnMoN25-18-6-5	-	S34565
1.4567 *	X3CrNiCu18-9-4		S30430
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316Ti	S31635
1.4578 *	X3CrNiCuMo17-11-3-2	-	-
Austeniticko-feritická			
1.4062 *	X2CrNiN22-2--		S32202
1.4162	X2CrMnNiN21-5-1		S32101
1.4362	X2CrNiN23-4	2304#	S32304
1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	2507#	S32750
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	2205#	S32205
1.4482 *	X2CrMnNiMoN21-5-3		-
1.4501 *	X2CrNiMoCuWN25-7-4		S32760
1.4507 *	X2CrNiMoCuWN25-7-4		S32520
1.4662 *	X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2		S82441
Feritická			
1.4003	X2CrNi12	-	S41003
1.4016	X6Cr17	430	S43000
1.4509	X2CrTiNb18	441+	S43940
1.4512	X2CrTi12	409	S40900
1.4521	X2CrMoTi18-2	444	S44400
1.4621 *	X2CrNbCu21	-	S44500
Veškeré výše uvedené oceli jsou uvedené v normě EN 10088-4/5 s výjimkou těch, které jsou označeny *, ty jsou v současné době uvedeny pouze v normě EN 10088-2/3. # Běžně používané obchodní názvy. + 441 je běžně používaný obchodní název této oceli, nikoli však označení podle ASTM.			

Příloha B Zvýšení pevnosti průřezů tvářených za studena

Následující vzorce lze využít pro všechny typy průřezů tvářených za studena.

Zpevnění vznikající při výrobě tvářením za studena může být při návrhu průřezu nebo prutu zahrnuto nahrazením smluvní meze kluzu f_y průměrnou zvýšenou mezí kluzu f_{ya} . V případě vzpěru u tlacených prutů by měla být hodnota f_{ya} použita ve spojení s křivkami vzpěrné pevnosti uvedenými v tabulce 6.1. Tato metoda není v EN 1993-1-4 obsažena a jedná se do určité míry o nahrazení rozšíření metody používané v Národní příloze Velké Británie.

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

a) Pro lisované průřezy z korozivzdorné oceli může být, kvůli zohlednění tvářením za studena průřezů s rohy o úhlech 90°, použita průměrná zvýšená mez kluzu f_{ya} :

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,pb} + f_y (A - A_{c,pb})}{A} \quad (\text{B.1})$$

b) Pro za studena válcované čtyřhranné uzavřené průřezy (HTR) může být použita průměrná zvýšená mez kluzu f_{ya} pro zohlednění změny vlastností v rovných částech a v rozšířených rohových oblastech průřezu:

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,rolled} + f_{yf} (A - A_{c,rolled})}{A} \quad (\text{B.2})$$

c) Pro za studena válcované kruhové uzavřené průřezy (TR) může být použita průměrná zvýšená mez kluzu f_{ya} pro zohlednění změny vlastností během výroby:

$$f_{ya} = f_{yCHS} \quad (\text{B.3})$$

kde:

f_y je mez kluzu základního materiálu (tj. materiál plechu nebo cívky, z něhož jsou následně za studena tvářeny požadované průřezy, viz tabulka 2.2);

f_{yc} je předpokládaná zvýšená hodnota meze kluzu v rohové oblasti;

f_{yf} je předpokládaná zvýšená hodnota meze kluzu v rovné části;

f_{yCHS} je předpokládaná zvýšená hodnota meze kluzu kruhového průřezu;

A je plocha plného průřezu;

$A_{c,pb}$ je celková plocha rohových oblastí lisovaného průřezu;

$A_{c,rolled}$ je celková plocha rohových oblastí za studena válcovaného průřezu včetně rozšíření o $2t$, které rozšiřuje po obvodu průřezu rohovou oblast na obě strany.

$$(i) \text{ Stanovení } f_{yc}, f_{yf} \text{ a } f_{yCHS} \quad \text{kde } f_y \leq f_{yc} \leq f_u \quad (\text{B.4})$$

$$f_{yc} = 0,85K (\varepsilon_c + \varepsilon_{p0,2})^{n_p}$$

$$f_{yf} = 0,85K (\varepsilon_f + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad \text{kde } f_y \leq f_{yf} \leq f_u \quad (\text{B.5})$$

$$f_{yCHS} = 0,85K (\varepsilon_{CHS} + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad \text{kde } f_y \leq f_{yCHS} \leq f_u \quad (\text{B.6})$$

kde:

ε_c je deformace v rohové oblasti způsobené tvářením průřezu;

ε_f je deformace v rovné části uzavřeného čtyřhranného průřezu způsobené tvářením průřezu;

ε_{CHS} je deformace v kruhovém průřezu způsobené jeho tvářením.

kteřé jsou dány:

$$\varepsilon_c = \frac{t}{2(2r_i + t)} \quad (\text{B.7})$$

$$\varepsilon_f = \left[\frac{t}{900} \right] + \left[\frac{\pi t}{2(b + h - 2t)} \right] \quad (\text{B.8})$$

$$\varepsilon_{CHS} = \frac{t}{2(d - t)} \quad (\text{B.9})$$

$$\varepsilon_{p0,2} = 0,002 + \frac{f_y}{E} \quad (\text{B.10})$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}} \quad (\text{B.11})$$

$$n_p = \frac{\ln(f_y/f_u)}{\ln(\varepsilon_{p0,2}/\varepsilon_u)} \quad (\text{B.12})$$

kde:

f_u je mez pevnosti základního materiálu (tj. materiál plechu nebo sítku, z něhož jsou následně za studena tvářeny požadované průřezy, viz tabulka 2.2);

ε_u je deformace při dosažení meze pevnosti f_u podle rovnic (C.6) a (C.7);

r_i je vnitřní poloměr zaoblení, pokud není znám lze uvažovat jako $2t$.

(ii) Stanovení celkové plochy rohových oblastí průřezu $A_{c,pb}$ a $A_{c,rolled}$

$$A_{c,pb} = \left(n_c \pi \frac{t}{4} \right) (2r_i + t) \quad (\text{B.13})$$

$$A_{c,rolled} = \left(n_c \pi \frac{t}{4} \right) (2r_i + t) + 4n_c t^2 \quad (\text{B.14})$$

kde n_c je počet 90° rohů v průřezu.

Příloha C Materiálový model

Křivka pracovního diagram nelineárního materiálu s vlivem zpevnění může být stanovena podle následujících výrazů:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left[\frac{\sigma}{f_y} \right]^n \quad \text{pro } \sigma \leq f_y \quad (\text{C.1})$$

$$\varepsilon = 0,002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \varepsilon_u \left[\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right]^m \quad \text{pro } f_y < \sigma \leq f_u \quad (\text{C.2})$$

kde:

σ je inženýrské napětí;

ε je inženýrská deformace;

E , f_y a f_u jsou uvedeny v části 2.3.1 nebo normě EN 10088;

n je součinitel, který může být převzat z tabulky 6.4 nebo lze stanovit z naměřených hodnot podle rovnice:

$$n = \frac{\ln(4)}{\ln \left[\frac{f_y}{R_{p0,05}} \right]} \quad (\text{C.3})$$

ve které:

$R_{p0,05}$ je napětí při 0,05 % plastické deformace.

Norma EN 1993-1-4 v současné době udává méně přesný výraz pro n (rovnice C.4), který je založen na napětí při 0,01 % plastické deformace. Očekává se, že v příštím vydání EN 1993-1-4 bude tento vztah nahrazen rovnicí (C.3).

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln \left[\frac{f_y}{R_{p0,01}} \right]} \quad (\text{C.4})$$

E_y je tečnový modul pružnosti na mezi kluzu získaný z rovnice:

$$E_y = \frac{E}{1 + 0,002n \left[\frac{E}{f_y} \right]} \quad (\text{C.5})$$

ε_u je deformace při dosažení meze pevnosti f_u , která může být přibližně stanovena jako:

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \quad \text{pro austenitické a austeniticko-feritické} \quad (\text{C.6})$$

$$\varepsilon_u = 0,6 \left[1 - \frac{f_y}{f_u} \right] \quad \text{pro feritické oceli} \quad (\text{C.7})$$

ale $\varepsilon_u \leq A$ kde A je protažení po porušení podle EN 10088.

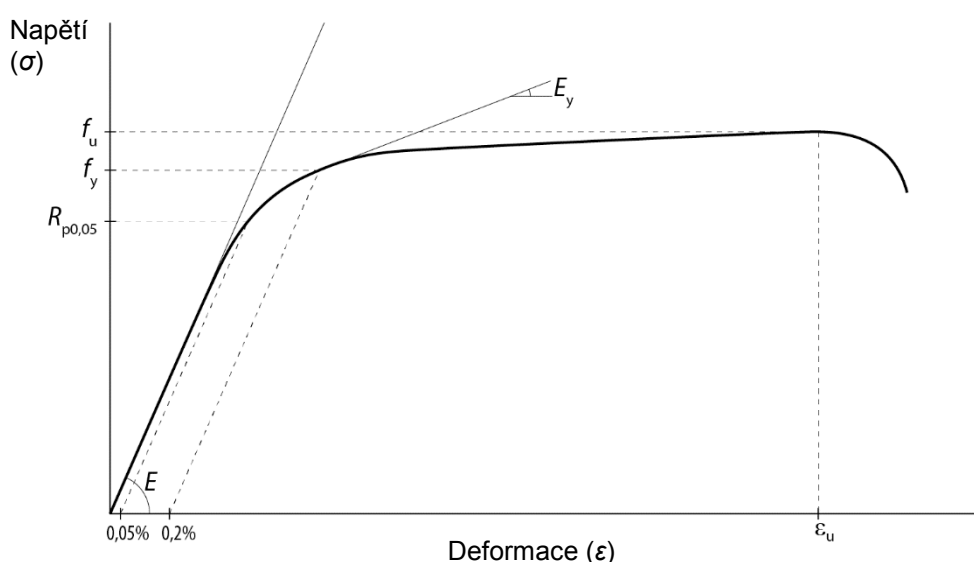
Norma EN 1993-1-4 v současné době poskytuje pouze rovnici (C.6). Nedávný výzkum ale ukázal, že tento výraz je v případě feritických ocelí nepřesný. Očekává se tedy, že v příštím vydání normy EN 1993-1-4 bude zahrnuta i rovnice (C.7).

$$m = 1 + 2,8 \frac{f_y}{f_u} \quad \text{pro všechny třídy} \quad (\text{C.8})$$

Norma EN 1993-1-4 v současné době poskytuje méně přesný výraz pro m (rovnice C.9). Očekává se, že v příštím vydání EN 1993-1-4 bude tento vztah nahrazen rovnicí (C.8).

$$m = 1 + 3,5 \frac{f_y}{f_u} \quad (\text{C.9})$$

Obrázek C.1 zobrazuje klíčové parametry materiálového modelu



Obrázek C.1 Klíčové parametry materiálového modelu

Pokud jsou známé naměřené hodnoty f_y , tak f_u může být vyčísleno pomocí následujících vztahů:

$$\frac{f_y}{f_u} = 0,2 + 185 \frac{f_y}{E} \quad \text{pro austenitické a austeniticko-feritické} \quad (\text{C.10})$$

$$\frac{f_y}{f_u} = 0,46 + 145 \frac{f_y}{E} \quad \text{pro feritické oceli} \quad (\text{C.11})$$

Při návrhu konstrukce pomocí MKP (metoda konečných prvků) softwaru mají být použity nominální hodnoty materiálových vlastností (způsob 1 v tabulce C.1). Pro návrh pomocí analýzy využívající materiálové vlastnosti získané ze zkoušek, lze postupovat podle způsobů 2 až 4 v tabulce C.1, podle toho jaké parametry byly změřeny.

Tabulka C.1 *Různé způsoby pro stanovení křivky pracovního diagramu*

Typ MKP analýzy	E	f_y	f_u	ε_u	n	m
Způsob 1. Návrh pomocí nominálních hodnot	Část 2.3.1	Část 2.3.1	Část 2.3.1	Rovnice. (C.6) nebo (C.7)	Tabulka 6.4	Rovnice (C.8)
Způsob 2. Návrh pouze se změřeným f_y	Část 2.3.1	Změřeno	Rovnice. (C.10) nebo (C.11)	Rovnice (C.6) nebo (C.7)	Tabulka 6.4	Rovnice (C.8)
Způsob 3. Návrh pomocí změřeného E , f_y a f_u	Změřeno	Změřeno	Změřeno	Rovnice (C.6) nebo (C.7)	Tabulka 6.4	Rovnice (C.8)
Způsob 4. Návrh/validace MKP modelu pomocí kompletní změřené křivky pracovního diagramu	Změřeno	Změřeno	Změřeno	Změřeno	Změřeno nebo pomocí regrese nebo rovnicí (C.3)	Změřeno nebo pomocí regrese

Následující výrazy mohou být použity pro stanovení tzv. skutečné křivky pracovního diagramu z křivky založené na tzv. inženýrských hodnotách:

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (C.12)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (C.13)$$

Některé komerční MKP softwary vyžadují definici materiálu založenou na plastické deformaci. Pro tyto případy je nutné stanovit napětí a deformace od meze úměrnosti dále. Plastická deformace, odpovídající příslušné hodnotě napětí, lze vypočítat pomocí rovnice (C.14) a mez úměrnosti je možné uvažovat jako napětí odpovídající plastické deformaci o hodnotě $\varepsilon_{pl} = 1 \times 10^{-4}$.

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \frac{f_y}{E} \quad (C.14)$$

Příloha D Metoda CSM (Continuous strength method)

D.1 Obecné informace

Metoda CSM (continuous strength method) je založena na deformacích prutu a zohledňuje vliv zpevnění materiálu a spolupůsobení částí průřezu při stanovení průřezové únosnosti. Pružný model CSM metody s lineárním průběhem zpevnění materiálu je popsán v části D.2, zatímco stanovení základních křivek pro určení deformační kapacity při působícím zatížení podle metody CSM je vysvětleno v části D.3. Části D.5 a D.6 poskytují vztahy pro stanovení únosnosti průřezu.

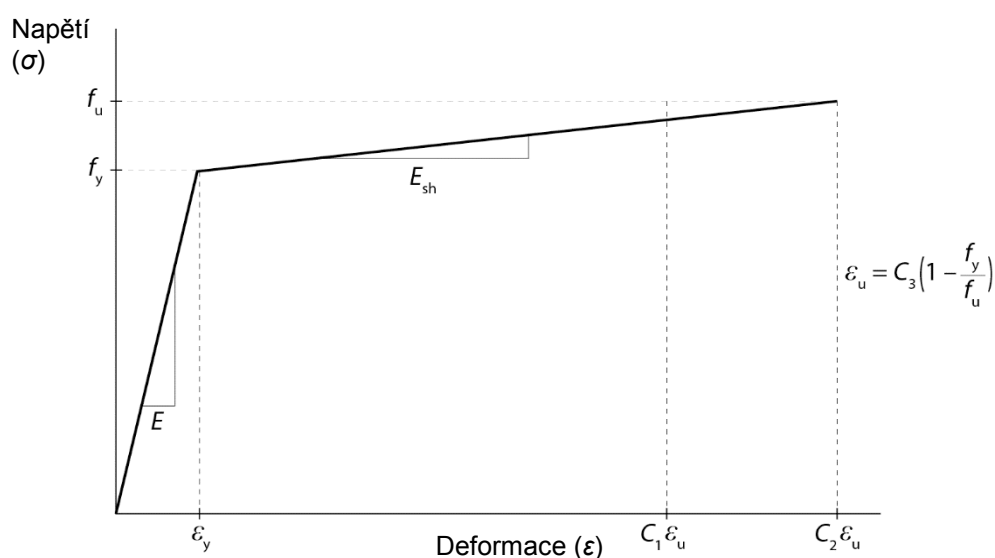
Tato příloha se zabývá stanovením průřezové únosnosti průřezů s rovnými stěnami (např. dvojose symetrické I průřezy, HTR, jednoose symetrické U a T průřezy a asymetrické úhelníky) a kruhových průřezů (TR) namáhaných buď samostatným, nebo také kombinovaným zatížením. V případě symetrických průřezů je CSM metoda nejvýhodnější pro průřezy s malou poměrnou štíhlostí. Pokud poměrná štíhlost stěnového průřezu přesáhne hodnotu 0,68 (v případě kruhového průřezu 0,30) výhody této metody již nejsou tak významné. U asymetrických průřezů je metoda CSM vysoce výhodná bez ohledu na poměrnou štíhlost průřezu.

Pro průřezy tvářené za studena může průměrná zvýšená hodnota meze kluzu f_{ya} (viz příloha B) nahradit mez kluzu f_y .

Tato příloha se vztahuje pouze na statický návrh konstrukce při běžné teplotě. Konstrukce také musí splňovat požadavky na použitelnost, které je nutné posoudit.

D.2 Materiálový model

Pružný materiálový CSM model s lineárním průběhem zpevnění, využívající tři materiálové součinitele (C_1 , C_2 and C_3), je zobrazen na obrázku D.1. Součinitele materiálu jsou uvedeny v tabulce D.1.



Obrázek D.1 Pružný materiálový CSM model s lineárním zpevněním

kde:

- f_y je mez kluzu;
- ε_y je deformace na mezi kluzu, stanovená jako $\varepsilon_y = f_y/E$;
- E je modul pružnosti;
- E_{sh} je modul pružnosti s vlivem zpevnění;
- f_u je napětí na mezi pevnosti;
- ε_u je deformace na mezi pevnosti f_u , stanovená jako $C_3(1 - f_y/f_u)$.

Tabulka D.1 Materiálové součinitele CSM modelu

Typ oceli	C_1	C_2	C_3
Austenitická	0,10	0,16	1,00
Austeniticko-feritická	0,10	0,16	1,00
Feritická	0,40	0,45	0,60

Modul pružnosti s vlivem zpevnění se stanoví jako:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (D.1)$$

D.3 Deformační kapacita průřezu

D.3.1 Základní křivka

Základní křivka definující vztah mezi deformační kapacitou průřezu a poměrnou štíhlostí průřezu $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$, potřebná ke stanovení únosnosti průřezu, je definovaná rovnicemi (D.2) pro stěnové průřezy a rovnicemi (D.3) pro kruhové průřezy.

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) & \text{pro } \bar{\lambda}_p \leq 0,68 \\ \left(1 - \frac{0,222}{\bar{\lambda}_p^{1,050}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_p^{1,050}} & \text{pro } \bar{\lambda}_p > 0,68 \end{cases} \quad (D.2)$$

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{4,44 \times 10^{-3}}{\bar{\lambda}_c^{4,5}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) & \text{pro } \bar{\lambda}_c \leq 0,30 \\ \left(1 - \frac{0,224}{\bar{\lambda}_c^{0,342}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_c^{0,342}} & \text{pro } \bar{\lambda}_c > 0,30 \end{cases} \quad (D.3)$$

kde:

- $\bar{\lambda}_p$ je poměrná štíhlost stěnového průřezu;
- $\bar{\lambda}_c$ je poměrná štíhlost kruhového průřezu.

D.3.2 Poměrná štíhlost průřezu

Poměrná štíhlost průřezu se stanoví jako:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y/f_{cr,p}} \quad \text{pro stěnové průřezy}$$

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

Pro stěnové průřezy se kritické napětí plného průřezu vystaveného účinkům zatížení může stanovit numericky pomocí softwaru (například CUFISM, dostupný na adrese www.ce.jhu.edu/bschafer/cufism), nebo může být konzervativně uvažováno jako kritické napětí nejštíhlejší části průřezu:

$$f_{cr,p} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2} \quad (\text{D.4})$$

kde:

- \bar{b} je šířka uvažované rovné části průřezu;
- t je tloušťka uvažované části průřezu;
- ν je Poissonova konstanta;
- k_σ je součinitel kritického napětí odpovídající poměru napětí ψ a okrajovým podmínkám, jeho hodnoty jsou uvedeny pro vnitřní části průřezu v tabulce 5.3 a pro přečnávající části průřezu v tabulce 5.4.

Pro kruhové průřezy může být kritické napětí plného průřezu, jak pro tlak, ohyb nebo kombinaci zatížení, stanoveno ze vztahu:

$$f_{cr,c} = \frac{E}{\sqrt{3(1 - \nu^2)}} \frac{2t}{D} \quad (\text{D.5})$$

kde:

- D je průměr průřezu;
- t je tloušťka stěny průřezu.

D.4 Únosnost průřezu namáhaného tlakem

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

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}} \quad (\text{D.6})$$

kde:

- A je plocha průřezu;
- f_{csm} je návrhová pevnost materiálu odpovídající ε_{csm} daná vztahem:

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y (\varepsilon_{csm} / \varepsilon_y - 1) \quad (\text{D.7})$$

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

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{\varepsilon_{csm} A f_y}{\varepsilon_y \gamma_{M0}} \quad (\text{D.8})$$

D.5 Únosnost průřezu namáhaného ohybem

D.5.1 Ohyb okolo osy symetrie

Pro dvojose symetrické průřezy (tj. I průřezy, HTR a TR) a jednoose symetrické průřezy (tj. U a T průřezy) namáhané ohybem okolo osy symetrie se maximální možná deformace ε_{csm} stanoví na základě rovnic (D.2) nebo (D.3).

Pro průřezy s $\varepsilon_{\text{csm}}/\varepsilon_y \geq 1,0$ se ohybová únosnost průřezu stanoví jako:

$$M_{\text{c,Rd}} = M_{\text{csm,Rd}} = \frac{W_{\text{pl}} f_y}{\gamma_{\text{M0}}} \left[1 + \frac{E_{\text{sh}}}{E} \frac{W_{\text{el}}}{W_{\text{pl}}} \left(\frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left(1 - \frac{W_{\text{el}}}{W_{\text{pl}}} \right) / \left(\frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} \right)^{\alpha} \right] \quad (\text{D.9})$$

kde:

W_{el} je pružný průřezový modul;

W_{pl} je plastický průřezový modul;

α je ohybový CSM součinitel uvedený v tabulce D.2.

Pro průřezy s $\varepsilon_{\text{csm}}/\varepsilon_y < 1,0$ se ohybová únosnost průřezu stanoví jako:

$$M_{\text{c,Rd}} = M_{\text{csm,Rd}} = \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} \frac{W_{\text{el}} f_y}{\gamma_{\text{M0}}} \quad (\text{D.10})$$

D.5.2 Ohyb okolo osy, která není osou symetrie

Pro asymetrické průřezy (úhelníky) a jednoose symetrické průřezy (U a T průřezy) namáhané ohybem okolo osy, která není osou symetrie, se maximální možná deformace tlačené části průřezu $\varepsilon_{\text{csm,c}}$ stanoví pomocí rovnice (D.2) (tj. $\varepsilon_{\text{csm,c}} = \varepsilon_{\text{csm}}$), zatímco maximální možná deformace tažené části průřezu $\varepsilon_{\text{csm,t}}$ se vypočítá na základě předpokladu lineárního průběhu napětí po průřezu a polohy neutrální osy shodně s neutrální osou v pružném stavu. Maximální návrhová deformace $\varepsilon_{\text{csm,max}}$ je uvažována jako větší z hodnot $\varepsilon_{\text{csm,c}}$ a $\varepsilon_{\text{csm,t}}$.

Pokud je deformace $\varepsilon_{\text{csm,max}}$ menší než deformace na mezi kluzu ε_y , je vhodné použít pružnou neutrální osu a ohybovou únosnost průřezu stanovit podle rovnice (D.10), přičemž $\varepsilon_{\text{csm}} = \varepsilon_{\text{csm,max}}$.

Pokud je deformace $\varepsilon_{\text{csm,max}}$ větší než deformace na mezi kluzu ε_y , neutrální osa se posune do místa rovnováhy průřezu, nebo se dá uvažovat, že prochází středem vzdálenosti mezi pružnou a plastickou neutrální osou; následně by měly být přepočítány hodnoty $\varepsilon_{\text{csm,t}}$ a $\varepsilon_{\text{csm,max}}$ a ohybová únosnost průřezu se stanoví pomocí rovnice (D.9), přičemž $\varepsilon_{\text{csm}} = \varepsilon_{\text{csm,max}}$ a hodnoty součinitele ohybu α všech průřezů které nejsou dvojose symetrické, ohýbaných okolo osy která není osou symetrie, jsou uvedeny v tabulce D.2.

Tabulka D.2 Součinitel ohybu α metody CSM

Průřez	Ohyb okolo osy	Poměr stran	α
HTR	Libovolná	Libovolný	2,0
TR	Libovolná	–	2,0
I průřez	y-y	Libovolný	2,0
	z-z	Libovolný	1,2
U průřez	y-y	Libovolný	2,0
	z-z	$h/b \leq 2$	1,5
		$h/b > 2$	1,0
T průřez	y-y	$h/b < 1$	1,0
		$h/b \geq 1$	1,5
	z-z	Libovolný	1,2
Úhelník	y-y	Libovolný	1,5
	z-z	Libovolný	1,0

D.6 Únosnost průřezu namáhaného kombinací tlaku a ohybu

D.6.1 Čtverhranné uzavřené profily namáhané kombinovaným zatížením

Pro HTR s $\bar{\lambda}_p \leq 0,60$ je podmínka spolehlivosti průřezu namáhaného kombinací tlaku s ohybem okolo hlavní osy, ohybem okolo vedlejší osy nebo šikmým ohybem dána rovnicemi (D.11) až (D.13):

$$M_{y,Ed} \leq M_{R,csm,y,Rd} = M_{csm,y,Rd} \frac{(1 - n_{csm})}{(1 - 0,5a_w)} \leq M_{csm,y,Rd} \quad (D.11)$$

$$M_{z,Ed} \leq M_{R,csm,z,Rd} = M_{csm,z,Rd} \frac{(1 - n_{csm})}{(1 - 0,5a_f)} \leq M_{csm,z,Rd} \quad (D.12)$$

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{R,csm,y,Rd}} \right]^{\alpha_{csm}} + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{R,csm,z,Rd}} \right]^{\beta_{csm}} \leq 1 \quad (D.13)$$

kde:

$M_{y,Ed}$ je návrhový moment únosnosti okolo hlavní osy (y-y);

$M_{z,Ed}$ je návrhový moment únosnosti okolo vedlejší osy (z-z);

$M_{R,csm,y,Rd}$ je redukovaný moment únosnosti podle metody CSM okolo hlavní osy (y-y);

$M_{R,csm,z,Rd}$ je redukovaný moment únosnosti podle metody CSM okolo vedlejší osy (z-z);

a_w je poměr plochy stěny k ploše plného průřezu;

a_f je poměr plochy pásnice k ploše plného průřezu;

n_{csm} je poměr návrhové tlakové síly N_{Ed} k únosnosti průřezu v tlaku podle metody CSM $N_{csm,Rd}$;

α_{csm} a β_{csm} jsou interakční součinitele pro šikmý ohyb stanoveny jako $1,66/(1 - 1,13n_{\text{csm}}^2)$.

Pro HTR s $\bar{\lambda}_p > 0,60$ je uvedena lineární podmínka spolehlivosti:

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{csm,Rd}}} + \frac{M_{y,\text{Ed}}}{M_{\text{csm},y,\text{Rd}}} + \frac{M_{z,\text{Ed}}}{M_{\text{csm},z,\text{Rd}}} \leq 1 \quad (\text{D.14})$$

D.6.2 Kruhové trubky namáhané kombinovaným zatížením

Pro TR profily s $\bar{\lambda}_c \leq 0,27$ je podmínka spolehlivosti průřezu namáhaného kombinací tlaku a ohybu dána jako:

$$M_{\text{Ed}} \leq M_{\text{R,csm,Rd}} = M_{\text{csm,Rd}}(1 - n_{\text{csm}}^{1,7}) \quad (\text{D.15})$$

Pro TR s $\bar{\lambda}_c > 0,27$ je uvedena lineární podmínka spolehlivosti:

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{csm,Rd}}} + \frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{csm,Rd}}} \leq 1 \quad (\text{D.16})$$

Příloha E Pružný kritický moment při klopení

E.1 Obecné informace

Pro průřezy symetrické k rovině ohybu může být pružný kritický moment M_{cr} stanoven podle části E.2. V ostatních případech se M_{cr} může stanovit stabilitní analýzou prutu za předpokladu, že ve výpočtu budou zahrnuty všechny parametry, které mohou ovlivnit hodnotu M_{cr} :

- Geometrie průřezu;
- Podmínky deplanace;
- Poloha příčného zatížení vzhledem ke středu smyku;
- Podmínky podepření.

Specifický software pro výpočet kritického momentu M_{cr} LTBeam lze bezplatně stáhnout z následujících webových stránek: www.cticm.com.

E.2 Průřezy symetrické k rovině ohybu

Tato metoda lze použít pouze pro rovinné pruty konstantního průřezu, které mají kolmo k rovině ohybu symetrický průřez. Konce prutu jsou podepřeny alespoň:

- Proti příčnému posunu; a
- Proti pootočení okolo podélné osy.

M_{cr} může být vypočten z následujícího vztahu, který byl odvozen z teorie boulení

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right\} \quad (E.1)$$

kde:

I_t je moment setrvačnosti v prostém kroucení;

I_w je výsečový moment setrvačnosti;

I_z je moment setrvačnosti kolem vedlejší osy;

k a k_w jsou součinitele vzpěrné délky;

L je délka prutu mezi body zajištěnými proti příčnému posunu;

z_g je souřadnice působíště zatížení vzhledem ke středu smyku;

Poznámka: u dvojose symetrických průřezů je pozice středu smyku stejná jako pozice těžiště.

C_1 je součinitel ekvivalentního konstantního momentu zohledňující průběh ohybového momentu;

C_2 je součinitel spojený s velikostí zatížení podél prutu závislý na průběhu ohybového momentu.

Součinitel k popisuje okrajové podmínky uložení v příčném ohybu. Odpovídá poměru vzpěrné délky k systémové délce tláčeného prvku. Pro uvažování jeho hodnoty menší než 1,0 je nutné jasné odůvodnění.

Součinitel k_w popisuje okrajové podmínky s ohledem na deplanaci. Nejsou-li zavedena žádná zvláštní opatření zamezující deplanaci, hodnota k_w má být uvažována jako 1,0.

V případě běžného kloubově uloženého prutu jsou hodnoty k a k_w rovny 1,0.

V obecném případě je z_g kladné při zatížení směřujícím z místa působení do středu smyku.

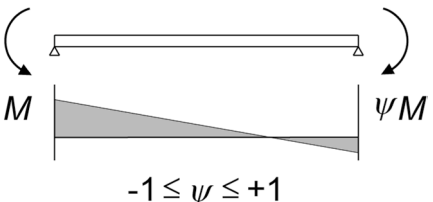
E.3 Součinitele C_1 a C_2

Průběh ohybového momentu po délce prutu ovlivňuje velikost pružného kritického momentu M_{cr} . Vliv proměnlivého průběhu ohybového momentu na pružný kritický moment M_{cr} lze zohlednit pomocí součinitele ekvivalentního konstantního momentu C_1 . Nejčastějším případem je konstantní průběh ohybového momentu, pro který se $C_1 = 1,0$. Stejná hodnota lze uvažovat i pro ostatní průběhy ohybových momentů, avšak se zvyšujícím se rozdílem koncových momentů se tato varianta stává velmi konzervativní.

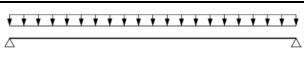

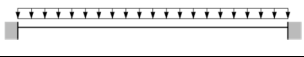

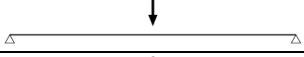

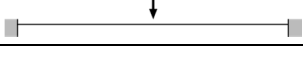
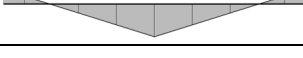
Součinitel C_2 je nutné použít v případě, kdy je prut vystaven destabilizujícímu zatížení. Zatížení působící do středu smyku má destabilizující účinky vedoucí ke snížení hodnoty M_{cr} , zatímco zatížení působící ze středu smyku má stabilizující účinky vedoucí ke zvýšení hodnoty M_{cr} .

Tabulky E.1 a E.2 udávají hodnoty součinitelů C_1 a C_2 .

Tabulka E.1 Hodnoty C_1 při zatížení koncovými momenty (pro $k = 1,0$)

Koncové momenty a způsob uložení	ψ	C_1
 $-1 \leq \psi \leq +1$	+1,00	1,00
	+0,75	1,17
	+0,50	1,36
	+0,25	1,56
	0,00	1,77
	-0,25	2,00
	-0,5	2,24
	-0,75	2,49
	-1,00	2,76

Tabulka E.2 Hodnoty C_1 a C_2 pro případ příčného zatížení (pro $k = 1,0$)

Způsob zatížení a uložení	Průběh ohybového momentu	C_1	C_2
		1,13	0,454
		2,60	1,55
		1,35	0,630
		1,69	1,65

ČÁST 2 – ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

V této části příručky je ukázáno 15 řešených příkladů navrhování prvků z korozivzdorné oceli s použitím pravidel, které byly vysvětleny v předchozí části příručky.

Obsah příkladů:

Příklad 1

Návrh sloupu kruhového průřezu.

Příklad 2

Návrh příčně podepřeného sloupu svařovaného I-průřezu.

Příklad 3

Návrh spojitého trapézového plechu z korozivzdorné oceli 1.4003.

Příklad 4

Únavová pevnost svařovaného styčnicku z uzavřených průřezů.

Příklad 5

Svařovaný přípoj.

Příklad 6

Šroubovaný přípoj.

Příklad 7

Smyková únosnost nosníku.

Příklad 8

Únosnost nosníku zatíženého koncentrovanou silou.

Příklad 9

Nosník s tlačenou pásnicí částečně podepřenou proti klopení

Příklad 10

Excentricky zatížený sloup za požáru.

Příklad 11

Návrh spojitého za studena zpracovaného trapézového plechu.

Příklad 12

Návrh nosníku na ohyb s vlivem klopení.

Příklad 13

Příhradový vazník z uzavřených průřezů za požáru.

Příklad 14

Stanovení zvýšené průměrné meze kluzu pro za studena tvarované průřezy.

Příklad 15

Návrh průřezu na ohyb metodou CSM.

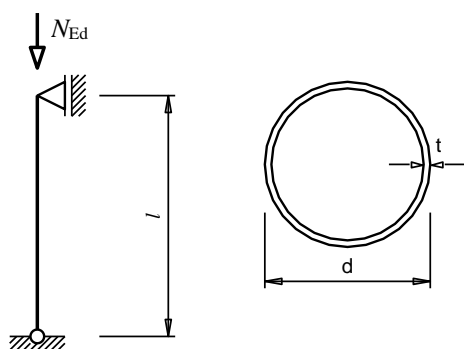
Materiál trapézového plechu v příkladu 3 je korozivzdorná feritická ocel 1.4003. Materiál nosníku z příkladu 7 a 8 je austeniticko-feritická korozivzdorná ocel 1.4462. V ostatních příkladech je zvolena korozivzdorná austenitická ocel 1.4301 nebo 1.4401.

Jednotlivé odkazy v okrajové části příkladů jsou odkazy na části, výrazy či rovnice uvedené v příručce, pokud není výslovně uvedeno jinak.

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST) PŘÍKLADOVÁ ČÁST	List 1 z 2													
	Název	Příklad 1 – Návrh sloupu kruhového průřezu												
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	<table border="1"> <tr> <td>Vypracoval</td> <td>HS</td> <td>Dat</td> <td>07/02</td> </tr> <tr> <td>Revidoval</td> <td>JBL</td> <td>Dat</td> <td>03/06</td> </tr> <tr> <td>Revidoval</td> <td>FW</td> <td>Dat</td> <td>05/17</td> </tr> </table>	Vypracoval	HS	Dat	07/02	Revidoval	JBL	Dat	03/06	Revidoval	FW	Dat
Vypracoval	HS	Dat	07/02											
Revidoval	JBL	Dat	03/06											
Revidoval	FW	Dat	05/17											

PŘÍKLAD 1 – NÁVRH SLOUPU KRUHOVÉHO PRŮŘEZU

Sloup kruhového průřezu se nachází uvnitř vícepodlažní budovy a je na obou koncích kloubově uložen. Světlá výška podlaží je 3,50 m.



Okrajové podmínky

Kloubově uložený sloup, délka mezi patou a hlavou sloupu je:

$$l = 3,50 \text{ m}$$

Zatížení

Výsledná hodnota svislé síly od stálého a proměnného zatížení je:

$$N_{Ed} = 250 \text{ kN}$$

Průřezové charakteristiky

Za studena tvarovaná kruhová trubka o rozměrech 159×4 mm, korozivzdorná ocel 1.4307

$$\begin{array}{ll}
 d & = 159 \text{ mm} & t & = 4,0 \text{ mm} \\
 A & = 19,5 \text{ cm}^2 & I & = 585,3 \text{ cm}^4 \\
 W_{el} & = 73,6 \text{ cm}^3 & W_{pl} & = 96,1 \text{ cm}^3
 \end{array}$$

Materiálové charakteristiky

Mez kluzu $f_y = 220 \text{ N/mm}^2$ (pro pás válcovaný za studena).

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2 \text{ a } G = 76900 \text{ N/mm}^2$$

Zatřídění průřezu

$$\varepsilon = 1,01$$

Pro tlačný průřez: $d/t = 159/4 = 39,8$

Pro třídu 1 je splněna podmínka $d/t \leq 50\varepsilon^2$, proto je daný průřez třídy 1.

Tabulka 2.2
Část 2.3.1

Tabulka 5.2

Příklad 1	List 2 z 2
<p>Únosnost průřezu v prostém tlaku</p> <p>Pro průřezy třídy 1:</p> $N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0}$ $N_{c,Rd} = \frac{19,5 \times 220 \times 10^{-1}}{1,1} = 390 \text{ kN}$ <p>Vzpěrná únosnost tlačенého prutu</p> $N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}$ $\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$ $\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$ <p>Stanovení pružné kritické síly prutu:</p> $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 585,3 \times 10^4}{(3,50 \times 10^3)^2} \times 10^{-3} = 943,1 \text{ kN}$ <p>Stanovení poměrné štíhlosti prutu:</p> $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{19,5 \times 10^2 \times 220}{943,1 \times 10^3}} = 0,67$ <p>Při výpočtu je uvažován součinitel imperfekce $\alpha = 0,49$ a $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ (pro za studena tvarovaný kruhový průřez z korozivzdorné oceli):</p> $\phi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,67 - 0,2) + 0,67^2) = 0,84$ $\chi = \frac{1}{0,84 + [0,84^2 - 0,67^2]^{0,5}} = 0,74$ $N_{b,Rd} = 0,74 \times 19,5 \times 220 \times \frac{10^{-1}}{1,1} = 288,6 \text{ kN}$ <p>Sloup je zatížen silou $N_{Ed} = 250 \text{ kN}$.</p> <p>Navržený kruhový průřez 159×4 mm z korozivzdorné oceli 1.4307 vyhovuje.</p>	<p>Část 5.7.3</p> <p>Rov. 5.27</p> <p>Část 6.3.3</p> <p>Rov. 6.2</p> <p>Rov. 6.4</p> <p>Rov. 6.5</p> <p>Rov. 6.6</p> <p>Tabulka 6.1</p>

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)

PŘÍKLADOVÁ ČÁST

Název

Příklad 2 – Návrh příčně podepřeného sloupu svařovaného I-průřezu

Klient

Výzkumný fond pro uhlí a ocel

Vypracoval

HS

Dat 07/02

Revidoval

JBL

Dat 03/06

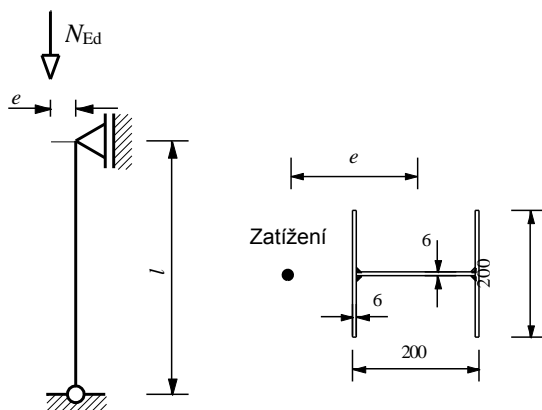
Revidoval

FW

Dat 06/17

PŘÍKLAD 2 - NÁVRH PŘÍČNĚ PODEPŘENÉHO SLOUPU SVAŘOVANÉHO I-PRŮŘEZU

Sloup ze svařovaného I-průřezu je na obou koncích kloubově uložen. Vybočení v ose menší tuhosti je zabráněno příčným podepřením po celé délce sloupu. Světla výška podlaží je 3,50 m. Sloup je excentricky zatížen svislou silou N_{Ed} (viz. obrázek níže).



Okrajové podmínky

Kloubově uložený sloup, délka mezi patou a hlavou sloupu je:

$$l = 3,50 \text{ m}$$

Velikost excentricity působícího zatížení je:

$$e = 200 \text{ mm}$$

Zatížení

Výsledná hodnota svislé síly od stálého a proměnného zatížení je:

$$N_{Ed} = 120 \text{ kN}$$

Vnitřní síly

Maximální ohybový moment způsobený excentrickým zatížením v hlavě sloupu je:

$$M_{y,\max Ed} = 120 \times 0,20 = 24 \text{ kNm}$$

Průřezové charakteristiky

Dvouose symetrický svařovaný I-průřez o rozměrech $200 \times 200 \text{ mm}$, tloušťka $t = 6,0 \text{ mm}$, korozivzdorná ocel 1.4401

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$t_f = 6,0 \text{ mm}$$

$$W_{el,y} = 259,1 \text{ cm}^3$$

$$h_w = 188 \text{ mm}$$

$$t_w = 6,0 \text{ mm}$$

$$W_{pl,y} = 285,8 \text{ cm}^3$$

$$a = 3,0 \text{ mm (velikost svaru)} \quad I_y = 2591,1 \text{ cm}^4$$

$$A_g = 35,3 \text{ cm}^2$$

$$i_y = 8,6 \text{ cm}$$

Materiálové charakteristiky

Mez kluzu $f_y = 220 \text{ N/mm}^2$ (pro pás válcovaný za tepla)

$E = 200000 \text{ N/mm}^2$ a $G = 76900 \text{ N/mm}^2$

Tabulka 2.2
Část 2.3

Zatřídění průřezu

$\varepsilon = 1,01$

Stojina – část namáhaná tlakem:

$$c/t = \frac{(188 - 3 - 3)}{6} = 30,3$$

Pro třídu 1 je splněna podmínka $c/t \leq 33,0\varepsilon$, proto je stojina průřezu třídy 1

Tabulka 5.2

Přečnívající část pásnice – pásnice namáhaná tlakem:

$$c/t = \frac{(200/2 - 6/2 - 3)}{6} = 94/6 = 15,7$$

Pro třídu 3 není splněna podmínka $c/t \leq 14,0\varepsilon$, proto je pásnice průřezu třídy 4

Celkově je průřez třídy 4

Stanovení účinných průřezových charakteristik

Stojina průřezu je plně účinná (třída 1); přečnívající tlačenu pásnici svařovaného I průřezu je třeba redukovat součinitelem boulení ρ následovně:

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

Rov. 5.2

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \text{ kde } \bar{b} = c = 94 \text{ mm}$$

Rov. 5.3

Za předpokladu rovnoměrného rozložení napětí v tlačené pásnici:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1$$

$$\Rightarrow k_\sigma = 0,43$$

Tabulka 5.4

$$\bar{\lambda}_p = \frac{94/6}{28,4 \times 1,01 \times \sqrt{0,43}} = 0,833$$

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1}{0,833} - \frac{0,188}{0,833^2} = 0,93$$

$$b_{\text{eff}} = 0,93 \times 94 = 87,4 \text{ mm}$$

Stanovení účinné průřezové plochy pro namáhání pouze tlakem:

$$A_{\text{eff}} = A_g - 4(1 - \rho)ct = 35,3 - 4 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times 10^{-2} = 33,7 \text{ cm}^2$$

Stanovení účinné průřezové plochy pro namáhání ohybem v ose větší tuhosti:

$$A_{\text{eff}} = A_g - 2(1 - \rho)ct = 35,3 - 2 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times 10^{-2} = 34,5 \text{ cm}^2$$

Stanovení velikosti posunu těžiště průřezu způsobeného zavedením účinných rozměrů pásnice při ohybu v ose větší tuhosti:

$$\bar{z}' = \frac{2 \times (1 - \rho)ct \times (h_w + t_f)/2}{A_{\text{eff}}} = \frac{2 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times (188 + 6)/2}{34,5 \times 10^{-2}}$$

$$= 2,2 \text{ mm (posunutí těžiště průřezu směrem od tlačené pásnice)}$$

Stanovení momentu setrvačnosti a pružného průřezového modulu účinného průřezu k ose větší tuhosti:

$$I_{\text{eff},y} = I_y - 2(1 - \rho)ct \left[\frac{t^2}{12} + \frac{(h_w + t_f)^2}{4} \right] - \bar{z}'^2 A_{\text{eff}}$$

$$I_{\text{eff},y} = 2591,1 - 2 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times \left[\frac{6^2}{12} + \frac{(188 + 6)^2}{4} \right] \times 10^{-4} - (2,2)^2 \times 34,5 \times 10^{-2}$$

$$I_{\text{eff},y} = 2515,1 \text{ cm}^4$$

$$W_{\text{eff},y} = \frac{I_{\text{eff},y}}{\frac{h_w}{2} + t_f + \bar{z}'} = \frac{2515,1}{\frac{18,8}{2} + 0,6 + 0,22} = 246,1 \text{ cm}^3$$

Vzpěrná únosnost tlačенého prutu v ose větší tuhosti průřezu

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

Rov. 6.3

$$A_{\text{eff}} = 33,7 \text{ cm}^2 \text{ pro průřez třídy 4 v tlaku}$$

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

Rov. 6.4

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

Rov. 6.5

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr}}}}$$

Rov. 6.7

$$L_{\text{cr}} = 350 \text{ cm (vzpěrná délka odpovídá délce celého sloupu)}$$

$$N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 EI}{L_{\text{cr}}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 2591,1 \times 10^4}{350^2 \times 10^2} \times 10^{-3} = 4175,2 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{33,7 \times 10^2 \times 220}{4175,2 \times 10^3}} = 0,421$$

Při výpočtu je uvažován součinitel imperfekce $\alpha = 0,49$ a $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ (pro svařované otevřené průřezy z korozivzdorné oceli):

Tabulka 6.1

$$\phi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,421 - 0,2) + 0,421^2) = 0,643$$

$$\chi = \frac{1}{0,643 + [0,643^2 - 0,421^2]^{0,5}} = 0,886$$

$$N_{b,Rd,y} = 0,886 \times 33,7 \times 10^2 \times 220 \times 10^{-3} / 1,1 = 597,23 \text{ kN}$$

Únosnost prutu při kombinaci osového tlaku a ohybu v ose větší tuhosti

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

Rov. 6.56

$$\begin{aligned} \beta_{W,y} &= W_{\text{eff}}/W_{pl,y} \text{ pro průřez třídy 4} \\ &= 246,1/285,8 = 0,861 \end{aligned}$$

e_{Ny} je vzhledem k symetrii průřezu rovno nule

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = 1,0 + 2 \times (0,421 - 0,5) \times \frac{120,0}{597,23} = 0,968$$

Rov. 6.61

$$1,2 + \frac{2N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = 1,2 + \frac{2 \times 120}{597,23} = 1,60$$

ale $1,2 \leq k_y \leq 1,60$

$$\Rightarrow k_y = 1,2$$

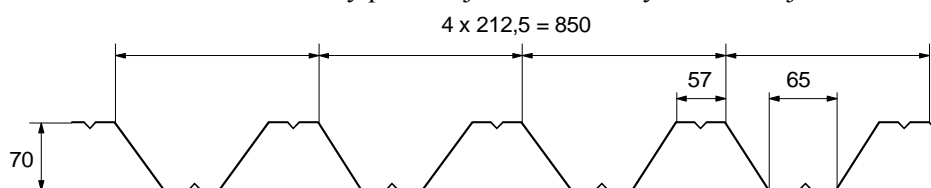
$$\frac{120,0}{597,23} + 1,2 \times \frac{24,0 \times 10^6}{0,861 \times 285,8 \times 10^3 \times 220/1,1} = 0,786 \leq 1$$

Navržený svařovaný I-průřez o rozměrech 200 x 200 mm a tloušťce plechu 6 mm z korozivzdorné oceli 1.4401 vyhovuje.

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)	List 1 z 7			
	Název	Příklad 3 – Návrh spojitého trapézového plechu		
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	Vypracoval	AAT Dat 06/02
			Revidoval	JBL Dat 04/06
Revidoval			SJ Dat 04/17	
PŘÍKLADOVÁ ČÁST				

PŘÍKLAD 3 – NÁVRH SPOJITÉHO TRAPÉZOVÉHO PLECHU

V příkladu je znázorněn postup návrhu trapézového plechu působícího jako spojitý nosník o dvou polích. Trapézový plech je navržen z korozivzdorné feritické oceli 1.4003 s tloušťkou 0,6 mm. Rozměry průřezu jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Příklad obsahuje následující části výpočtu:

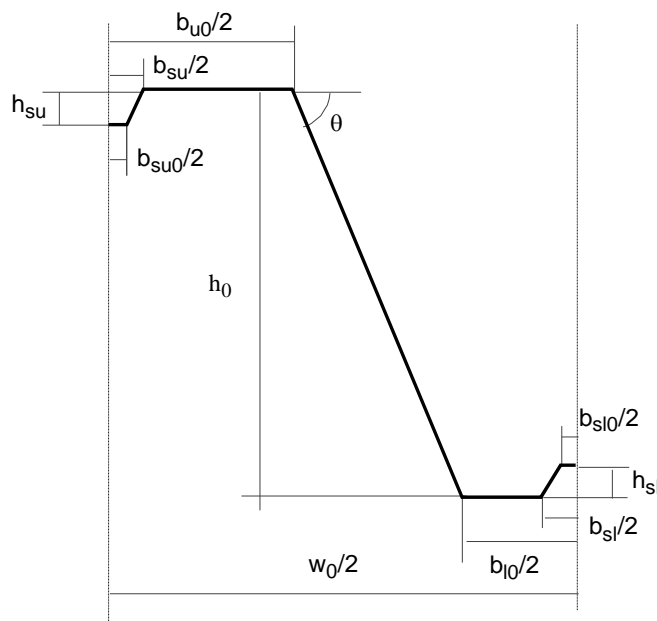
- stanovení charakteristik účinného průřezu při MSÚ
- stanovení únosnosti průřezu v ohybu
- stanovení únosnosti trapézového plechu nad mezilehlou podporou
- stanovení průhybu při MSP

Předpoklady návrhu

Rozpon jednoho pole	L	=	2900 mm
Šířka podpor	s_s	=	100 mm
Char. zatížení	Q	=	1,4 kN/m ²
Vlastní tíha	G	=	0,07 kN/m ²
Tloušťka plechu	t	=	0,6 mm
Mez kluzu	f_y	=	280 N/mm ²
Modul pružnosti	E	=	200000 N/mm ²
Součinitel materiálu	γ_{M0}	=	1,1
Součinitel materiálu	γ_{M1}	=	1,1
Součinitel zatížení	γ_G	=	1,35
Součinitel zatížení	γ_Q	=	1,50

Tabulka 2.2
Část 2.3.1
Tabulka 4.1
Tabulka 4.1
Část 4.3
Část 4.3

Označení a přesné velikosti částí průřezu jsou znázorněny na následujícím obrázku. Poloha trapézového plechu je zvolena tak, že při ohybu je horní pásnice nad mezilehlou podporou namáhána tlakem.



Rozměry osy průřezu:

$$h_0 = 70 \text{ mm}$$

$$w_0 = 212,5 \text{ mm}$$

$$b_{u0} = 65 \text{ mm}$$

$$b_{l0} = 57 \text{ mm}$$

$$b_{su} = 20 \text{ mm}$$

$$b_{su0} = 8 \text{ mm}$$

$$h_{su} = 6 \text{ mm}$$

$$b_{sl} = 20 \text{ mm}$$

$$b_{sl0} = 8 \text{ mm}$$

$$h_{sl} = 6 \text{ mm}$$

$r = 2 \text{ mm}$ (vnitřní poloměr
zaoblení rohů)

Úhel stojiny:

$$\theta = \arctg \left| \frac{h_0}{0,5(w_0 - b_{u0} - b_{l0})} \right| = \arctg \left| \frac{70}{0,5 \times (212,5 - 65 - 57)} \right| = 57,1^\circ$$

Charakteristiky účinného průřezu při mezním stavu únosnosti (MSÚ)

Kontrola maximálního dovoleného poměru šířky k tloušťce:

$$h_0/t = 70/0,6 = 117 \leq 400 \sin \theta = 336$$

$$\max(b_{l0}/t; b_{u0}/t) = b_{u0}/t = 65/0,6 = 108 \leq 400$$

Kontrola úhlu stojiny a velikosti zaoblení rohů:

$$45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$$

$$b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22,5 \text{ mm}$$

Vliv zaoblení rohů na únosnost průřezu lze zanedbat při splnění následujících podmínek pro poloměr zaoblení $r \leq 5t$ a $r \leq 0,10b_p$

$$r = 2 \text{ mm} \leq \min(5t; 0,1b_p) = \min(5 \times 0,6; 0,1 \times 22,5) = 2,25 \text{ mm}$$

Vliv zaoblení rohů na únosnost průřezu lze zanedbat.

Poloha neutrální osy v případě plně účinné stojiny průřezu

Stanovení redukčního součinitele ρ pro určení účinné šířky tláčené pásnice:

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

kde:

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

$$\bar{b} = b_p = 22,5 \text{ mm}$$

$$\psi = 1 \Rightarrow k_\sigma = 4$$

Část 5.2

Tabulka 5.1

Tabulka 5.1

Část 5.6.2

Část 5.4.1
Rov. 5.1

Rov. 5.3

Tabulka 5.3

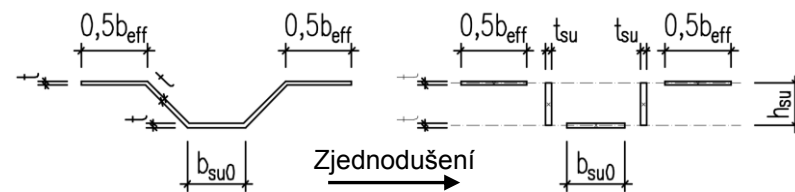
$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[\frac{235}{280} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,894$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{22,5/0,6}{28,4 \times 0,894 \times \sqrt{4}} = 0,738$$

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,772}{0,738} - \frac{0,079}{0,738^2} = 0,901 \leq 1$$

$$b_{\text{eff},u} = \rho \bar{b} = 0,901 \times 22,5 = 20,3 \text{ mm}$$

Účinné rozměry výztuhy pásnice



$$t_{\text{su}} = \frac{\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su}0}}{2}\right)^2}}{h_{\text{su}}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$A_s = (b_{\text{eff},u} + b_{\text{su}0})t + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}} = (20,3 + 8) \times 0,6 + 2 \times 6 \times 0,849 = 27,2 \text{ mm}^2$$

$$e_s = \frac{b_{\text{su}0}h_{\text{su}}t + 2h_{\text{su}}\frac{h_{\text{su}}}{2}t_{\text{su}}}{A_s} = \frac{8 \times 6 \times 0,6 + 2 \times 6 \times \frac{6}{2} \times 0,849}{27,2} = 2,18 \text{ mm}$$

$$I_s = 2(15t^2e_s^2) + b_{\text{su}0}t(h_{\text{su}} - e_s)^2 + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}}\left(\frac{h_{\text{su}}}{2} - e_s\right)^2 + 2\left(\frac{15t^4}{12}\right) + \frac{b_{\text{su}0}t^3}{12} + 2\frac{t_{\text{su}}h_{\text{su}}^3}{12}$$

$$I_s = 2 \times (15 \times 0,6^2 \times 2,18^2) + 8 \times 0,6 \times (6 - 2,18)^2 + 2 \times 6 \times 0,849 \times \left(\frac{6}{2} - 2,18\right)^2 + 2 \times \left(\frac{15 \times 0,6^4}{12}\right) + \frac{8 \times 0,6^3}{12} + 2 \times \frac{0,849 \times 6^3}{12} = 159,25 \text{ mm}^4$$

$$b_s = 2\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su}0}}{2}\right)^2} + b_{\text{su}0} = 2 \times \sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2} + 8 = 25,0 \text{ mm}$$

$$l_b = 3,07 \left[I_s b_p^2 \left(\frac{2b_p + 3b_s}{t^3} \right) \right]^{1/4}$$

$$l_b = 3,07 \times \left[159,25 \times 22,5^2 \times \left(\frac{2 \times 22,5 + 3 \times 25}{0,6^3} \right) \right]^{1/4} = 251 \text{ mm}$$

$$s_w = \sqrt{\left(\frac{w_0 - b_{u0} - b_{l0}}{2}\right)^2 + h_0^2} = \sqrt{\left(\frac{212,5 - 65 - 57}{2}\right)^2 + 70^2} = 83,4 \text{ mm}$$

$$b_d = 2b_p + b_s = 2 \times 22,5 + 25 = 70 \text{ mm}$$

Tabulka 5.2

Rov. 5.3

Tabulka 5.3

Část 5.5.3

Výraz 5.3

Výraz 5.3

Rov. 5.10

Fig. 5.5

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} = \sqrt{\frac{83,4 + 2 \times 70}{83,4 + 0,5 \times 70}} = 1,37$$

Rov. 5.11

$$\frac{l_b}{s_w} = \frac{251}{83,4} = 3,01 \geq 2 \Rightarrow k_w = k_{w0} = 1,37$$

Rov. 5.8

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}}$$

Rov. 5.4

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \times 1,37 \times 200 \times 10^3}{27,2} \times \sqrt{\frac{159,25 \times 0,6^3}{4 \times 22,5^2 \times (2 \times 22,5 + 3 \times 25)}} = 503,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{280}{503,4}} = 0,746$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 0,746 < 1,38$$

Rov. 5.17

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \times 0,746 = 0,93$$

$$t_{red,u} = \chi_d t = 0,93 \times 0,6 = 0,558 \text{ mm}$$

Vzdálenost neutrální osy od osy tlačené pásnice:

$$t_{sl} = \frac{\sqrt{h_{sl}^2 + \left(\frac{b_{sl} - b_{sl0}}{2}\right)^2}}{h_{sl}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$t_w = t / \sin\theta = 0,6 / \sin(57,1^\circ) = 0,714 \text{ mm}$$

e_i [mm]	A_i [mm ²]
0	$0,5b_{eff,u} t = 6,1$
0	$0,5b_{eff,u} \chi_d t = 5,66$
$0,5h_{su} = 3$	$h_{su} \chi_d t_{su} = 4,74$
$h_{su} = 6$	$0,5b_{su0} \chi_d t = 2,23$
$0,5h_0 = 35$	$h_0 t_w = 49,98$
$h_0 = 70$	$0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$
$h_0 - 0,5h_{sl} = 67$	$h_{sl} t_{sl} = 5,09$
$h_0 - h_{sl} = 64$	$0,5b_{sl0} t = 2,4$

$$A_{tot} = \sum A_i = 87,3 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_i e_i}{A_{tot}} = 34,9 \text{ mm}$$

Účinné rozměry tlačené stojiny průřezu

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} = 0,76t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \sigma_{com,Ed}}} = 0,76 \times 0,6 \times \sqrt{\frac{200}{1,1 \times 280 \times 10^{-3}}} = 11,6 \text{ mm}$$

$$s_{eff,n} = 1,5s_{eff,0} = 1,5 \times 11,6 = 17,4 \text{ mm}$$

EN 1993-1-3
Část
5.5.3.4.3(4-5)

Charakteristiky účinného průřezu půlvlny trapézového plechu

$$h_{\text{eff},1} = s_{\text{eff},1} \sin \theta = 11,6 \times \sin(57,1^\circ) = 9,74 \text{ mm}$$

$$h_{\text{eff},n} = s_{\text{eff},n} \sin \theta = 17,4 \times \sin(57,1^\circ) = 14,61 \text{ mm}$$

$e_{\text{eff},i} [\text{mm}]$	$A_{\text{eff},i} [\text{mm}^2]$	$I_{\text{eff},i} [\text{mm}^4]$
0	$0,5b_{\text{eff},u}t = 6,1$	≈ 0
0	$0,5b_{\text{eff},u} \chi_d t = 5,7$	≈ 0
$0,5h_{\text{su}} = 3$	$h_{\text{su}} \chi_d t_{\text{su}} = 4,7$	$\chi_d t_{\text{su}} h_{\text{su}}^3 / 12 = 14,2$
$h_{\text{su}} = 6$	$0,5b_{\text{su}0} \chi_d t = 2,2$	≈ 0
$0,5h_{\text{eff},1} = 4,9$	$h_{\text{eff},1} t_w = 7,0$	$t_w h_{\text{eff},1}^3 / 12 = 55,0$
$h_0 - 0,5(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) = 45,1$	$(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) t_w = 35,5$	$t_w \frac{(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n})^3}{12} = 7308,8$
$h_0 = 70$	$0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$	≈ 0
$h_0 - 0,5h_{sl} = 67$	$h_{sl} t_{sl} = 5,1$	$t_{sl} h_{sl}^3 / 12 = 15,3$
$h_0 - h_{sl} = 64$	$0,5b_{sl0} t = 2,4$	≈ 0

$$A_{\text{tot}} = \sum A_{\text{eff},i} = 79,8 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_{\text{eff},i} e_{\text{eff},i}}{A_{\text{tot}}} = 36,8 \text{ mm}$$

$$I_{\text{tot}} = \sum I_{\text{eff},i} + \sum A_{\text{eff},i} (e_c - e_{\text{eff},i})^2 = 7393,3 + 51667,2 = 59060,5 \text{ mm}^2$$

Ideálně lze přesnější průřezové charakteristiky stanovit iteračním výpočtem, kde při jednotlivých krocích dochází k posunům těžiště účinného průřezu.

Únosnost průřezu v ohybu na jednotku šířky (1 m)

$$I = \frac{1000}{0,5w_0} I_{\text{tot}} = \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 59060,5 = 555863,5 \text{ mm}^4$$

$$W_u = \frac{I}{e_c} = \frac{555863,5}{36,8} = 15105,0 \text{ mm}^3$$

$$W_l = \frac{I}{h_0 - e_c} = \frac{555863,5}{70 - 36,8} = 16742,9 \text{ mm}^3$$

$$\text{Protože } W_u < W_l \Rightarrow W_{\text{eff},\text{min}} = W_u = 15105,0 \text{ mm}^3$$

$$M_{c,\text{Rd}} = \frac{W_{\text{eff},\text{min}} f_y}{\gamma_{M0}} = 15105,0 \times 280 \times \frac{10^{-6}}{1,1} = 3,84 \text{ kNm}$$

Stanovení únosnosti plechu nad mezilehlou podporou**Borcení stojiny**

$$c \geq 40 \text{ mm}$$

$$r/t = 2/0,6 = 3,33 \leq 10$$

$$h_w/t = 70/0,6 = 117 \leq 200 \sin \theta = 200 \sin(57,1^\circ) = 168$$

EN 1993-1-3

Část 5.7.4

Rov. 5.31

Část 6.4.4

EN 1993-1-3

Část 6.1.7

$$45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$$

$$\beta_V = 0 \leq 0,2 \Rightarrow l_a = s_s = 100 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,15 \text{ (kategorie 2)}$$

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_y E} \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{r}{t}}\right) \left(0,5 + \sqrt{0,02 \frac{l_a}{t}}\right) \left[2,4 + \left(\frac{\varphi}{90}\right)^2\right] \frac{1}{\gamma_{M1}} \frac{1000}{0,5 w_0}$$

$$R_{w,Rd} = 0,15 \times 0,6^2 \sqrt{280 \times 200\,000} \times \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{2}{0,6}}\right) \left(0,5 + \sqrt{0,02 \times \frac{100}{0,6}}\right) \times \left[2,4 + \left(\frac{57,1}{90}\right)^2\right] \times \frac{1}{1,1} \times \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 10^{-3} = 18,4 \text{ kN}$$

EN 1993-1-3
Rov. 6.18

Kombinace ohybového momentu a podporové reakce

Návrhové zatížení na jednotku šířky (1 m):

$$q = \gamma_G G + \gamma_Q Q = 1,35 \times 0,07 + 1,5 \times 1,4 = 2,19 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = \frac{qL^2}{8} = \frac{2,19 \times 2,9^2}{8} = 2,30 \text{ kNm}$$

$$F_{Ed} = \frac{5}{4} qL = \frac{5}{4} \times 2,19 \times 2,9 = 7,94 \text{ kN}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{2,30}{3,84} = 0,599 \leq 1,0$$

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = \frac{7,94}{18,4} = 0,432 \leq 1,0$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = 0,599 + 0,432 = 1,031 \leq 1,25$$

EN 1993-1-3
Rov. 6.28a - c

Navržený průřez vyhovuje.

Stanovení průhybu při mezním stavu použitelnosti (MSP)

Charakteristiky účinného průřezu

Pro stanovení průhybu při MSP by měly být efektní průřezové charakteristiky stanoveny pro napětí způsobené odpovídající kombinací zatížení (kombinace pro MSP).

Konzervativně je hodnota maximálního tlakového napětí vypočtena pomocí účinného průřezového modulu W_u , který byl stanoven v předchozím výpočtu pro MSÚ.

EN 1993-1-3
Část 5.5.1

$$M_{y,Ed,ser} = \frac{(G + Q)L^2}{8} = \frac{(0,07 + 1,4) \times 2,9^2}{8} = 1,55 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{com,Ed,ser} = \frac{M_{y,Ed,ser}}{W_u} = \frac{1,55 \times 10^6}{15\,105} = 102,6 \text{ N/mm}^2$$

Charakteristiky účinného průřezu jsou stanoveny stejným způsobem jako v předchozích výpočtech, pouze je hodnota meze kluzu f_y nahrazena hodnotou napětí $\sigma_{com,Ed,ser}$ a tloušťka výztuhy pásnice není nijak redukována. Výsledky výpočtu jsou následující:

Účinná šířka tlačené pásnice:

Pásnice je plně účinná

Poloha neutrálné osy za předpokladu plně účinné stojiny:

$e_c = 34,48 \text{ mm}$

Účinná výška tlačené části stojiny:

Stojina je plně účinná

Charakteristiky účinného průřezu pro půlvlnu:

$$\begin{aligned} A_{\text{tot}} &= 88,41 \text{ mm}^2 \\ e_c &= 34,48 \text{ mm} \\ I_{\text{tot}} &= 63759,0 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Charakteristiky účinného průřezu na jednotku šířky (1 m):
(průřez je plně účinný)

$$\begin{aligned} I &= 600084,7 \text{ mm}^4 \\ W_u &= 17403,8 \text{ mm}^3 \\ W_l &= 16894,3 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Stanovení průhybu

Sečnový modul pružnosti odpovídající maximální hodnotě ohybového momentu:

$$\sigma_{1,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_u} = \frac{1,55 \times 10^6}{17403,8} = 89,06 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_l} = \frac{1,55 \times 10^6}{16894,3} = 91,75 \text{ N/mm}^2$$

$n = 14$ (pro feritickou korozivzdornou ocel 1.4003)

$$E_{S,1} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}} \left(\frac{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,089} \left(\frac{0,089}{0,28} \right)^{14}} = 200,0 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_{S,2} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}} \left(\frac{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,092} \left(\frac{0,092}{0,28} \right)^{14}} = 200,0 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_S = \frac{E_{S,1} + E_{S,2}}{2} = \frac{200 + 200}{2} = 200 \text{ kN/mm}^2$$

Pro daný typ korozivzdorné oceli a velikost napětí se vliv nelinearity materiálu na velikosti modulu pružnosti neprojeví.

Kontrola průhybu:

Pro stanovení tuhosti průřezu je třeba zohlednit vliv zaoblení rohů. Tento vliv je ve výpočtu zohledněn následovně:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} = 0,43 \frac{2 \times \frac{294,2^\circ}{90^\circ}}{149,3} = 0,019$$

$$I_{y,r} = I (1 - 2\delta) = 600084,7 (1 - 2 \times 0,019) = 577281,5 \text{ mm}^4$$

Pro místo maximálního průhybu platí:

$$x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times L = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times 2,9 = 1,22 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{(G + Q)L^4}{48E_S I_{y,r}} \left(\frac{x}{L} - 3 \frac{x^3}{L^3} + 2 \frac{x^4}{L^4} \right)$$

$$\delta = \frac{(0,07 + 1,4) \times 10^3 \times 2,9^4}{48 \times 200 \times 10^6 \times 577281,5 \times 10^{-12}} \times \left(\frac{1,48}{2,9} - 3 \times \frac{1,48^3}{2,9^3} + 2 \times \frac{1,48^4}{2,9^4} \right)$$

$$\delta = 4,64 \text{ mm}$$

Dovolená hodnota průhybu je $L/200 = 2900/200 = 14,5 \text{ mm} > 4,64 \text{ mm}$, tudíž vypočtená hodnota průhybu je přijatelná.

Tabulka 6.4

Rov. 6.53

Rov. 6.53

Rov. 6.52

Rov. 5.22

Rov. 5.20

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)	List 1 z 2			
	Název	Příklad 4 – Únavová pevnost svařovaného styčnicku z uzavřených průřezů		
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	Vypracoval AAAT	Dat 06/02
			Revidoval MEB	Dat 04/06
Revidoval UDE			Dat 01/17	
PŘÍKLADOVÁ ČÁST				

PŘÍKLAD 4 – ÚNAVOVÁ PEVNOST SVAŘOVANÉHO STYČNÍKU Z UZAVŘENÝCH PRŮŘEZŮ

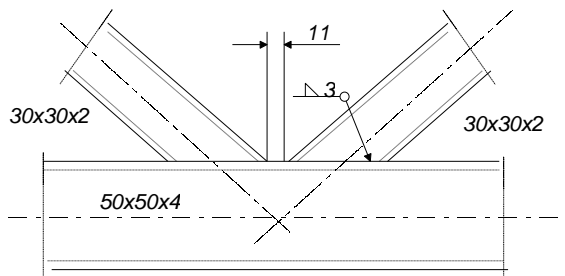
V příkladu je ukázán postup pro stanovení únavové pevnosti svařovaného styčnicku příhradové konstrukce, která je navržena z uzavřených průřezů. Únava by měla být při návrhu konstrukce z korozivzdorné oceli zohledněna v případech, kdy je konstrukce vystavena cyklickému namáhání. Typické konstrukce navržené s ohledem na únavu jsou například ropné plošiny, stožáry, komíny, mosty, jeřáby či dopravníky.

Únavovou pevnost austenitických i duplexních korozivzdorných ocelí lze stanovit podle EN 1993-1-9.

V příkladu jsou ukázány následující části výpočtu pro vyhodnocení únavové pevnosti:

- stanovení křivky únavové pevnosti
- stanovení sekundárních ohybových momentů ve styčnicku
- stanovení dílčích součinitelů bezpečnosti pro únavovou pevnost
- hodnocení únavové pevnosti pro zatížení s proměnou amplitudou rozkmitu

Pás příhradové konstrukce je navržen z průřezu HTR 50×50×4, diagonály jsou navrženy z průřezu HTR 30×30×2. Konstrukce je navržena z korozivzdorné austenitické oceli s mezí kluzu 210 N/mm².



Zatížení

Spektrum rozkmitu napětí pro pás příhradoviny pro požadovanou návrhovou životnost je:

Amplituda rozkmitu napětí:

Počet cyklů:

$$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$$

$$n_1 = 10 \times 10^3$$

$$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$$

$$n_2 = 100 \times 10^3$$

$$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$$

$$n_3 = 1000 \times 10^3$$

Kategorie detailu

Kategorie detailu pro daný styčnick závisí na dimenzích pásu a diagonál příhradové konstrukce. V tomto případě $b_0 = 50 \text{ mm}$, $b_i = 30 \text{ mm}$, $t_0 = 4 \text{ mm}$ a $t_i = 2 \text{ mm}$.

Protože $t_0/t_i = 2$, kategorie detailu je 71.

Protože $0,5(b_0 - b_i) = 10 \text{ mm}$, $g = 11 \text{ mm}$, $1,1(b_0 - b_i) = 22 \text{ mm}$ a $2t_0 = 8 \text{ mm}$, styčnick tudíž splňuje podmínky $0,5(b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_i)$ a $g \geq 2t_0$.

Část 9

Tabulka 2.2

Všechny odkazy jsou z EN 1993-1-9

Tabulka 8.7

Příklad 4	List 2 z 2												
<p>Vliv sekundárních ohybových momentů ve styčniku</p> <p>Vliv sekundárních ohybových momentů je ve výpočtu zohledněn vynásobením příslušného rozkmitu napětí koeficientem $k_1 = 1,5$.</p> <p>Dílčí součinitelé</p> <p>Za předpokladu přijatelné úrovně spolehlivosti a mírných důsledků porušení je doporučena hodnota dílčího součinitele spolehlivosti únavové pevnosti $\gamma_{Mf} = 1,0$. Dílčí součinitel spolehlivosti zatížení pro návrhové hodnoty rozkmitů je $\gamma_{Ff} = 1,0$.</p> <p>Hodnocení únavové pevnosti</p> <p>Referenční hodnota únavové pevnosti při 2×10^6 cyklů a pro kategorii detailu 71 je $\Delta\sigma_c = 71 \text{ N/mm}^2$. Křivka únavové pevnosti pro příhradovou konstrukci se sklonem křivky je $m = 5$. Počet cyklů pro odpovídající amplitudu rozkmitu napětí $\Delta\sigma_i$ je:</p> $N_i = 2 \times 10^6 \left[\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf} \gamma_{Ff} (k_1 \Delta\sigma_i)} \right]^m$ <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$</td> <td>$N_1 = 47,5 \times 10^3$</td> </tr> <tr> <td>$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$</td> <td>$N_2 = 283 \times 10^3$</td> </tr> <tr> <td>$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$</td> <td>$N_3 = 4640 \times 10^3$</td> </tr> </table> <p>Palmgrenova-Minerova hypotéza kumulace porušení</p> <p>Pro několikastupňové spektrum rozkmitů ($\Delta\sigma_i; n_i$): $D_{d,i} = n_{Ei} / N_{Ri}$ Proto</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$</td> <td>$D_{d,1} = 0,21$</td> </tr> <tr> <td>$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$</td> <td>$D_{d,2} = 0,35$</td> </tr> <tr> <td>$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$</td> <td>$D_{d,3} = 0,22$</td> </tr> </table> <p>Kumulativní porušení během návrhové životnosti konstrukce je:</p> $D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} = \sum D_{d,i} = 0,78 \leq 1,0$ <p>Protože vypočtené kumulativní poškození pásu příhradové konstrukce je menší než 1,0 (vypočtená životnost je tedy větší než požadovaná návrhová životnost), pás z hlediska únavy vyhoví.</p> <p>Výše popsaný postup se následně opakuje i pro diagonály příhradové konstrukce.</p>	$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$	$N_1 = 47,5 \times 10^3$	$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$	$N_2 = 283 \times 10^3$	$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$	$N_3 = 4640 \times 10^3$	$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$	$D_{d,1} = 0,21$	$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$	$D_{d,2} = 0,35$	$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$	$D_{d,3} = 0,22$	<p>Část 4 (2), Tabulka 4.2</p> <p>Část 3 (7), Tabulka 3.1</p> <p>Výraz 7.1</p> <p>A.5 (1)</p> <p>Rov. A.1</p> <p>Část 8 (4)</p>
$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$	$N_1 = 47,5 \times 10^3$												
$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$	$N_2 = 283 \times 10^3$												
$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$	$N_3 = 4640 \times 10^3$												
$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$	$D_{d,1} = 0,21$												
$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$	$D_{d,2} = 0,35$												
$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$	$D_{d,3} = 0,22$												

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)

PŘÍKLADOVÁ ČÁST

Název Příklad 5 – Svařovaný přípoj

Klient Výzkumný fond pro uhlí a ocel

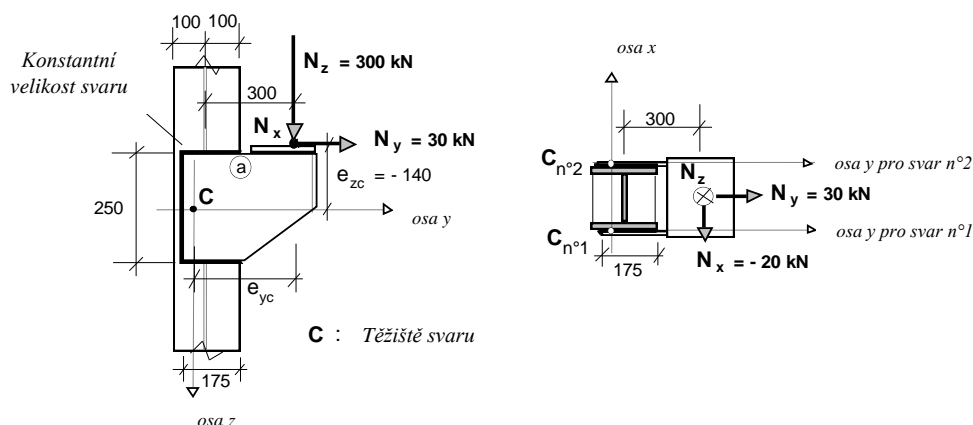
Vypracoval IR Dat 08/02

Revidoval MEB Dat 04/06

Revidoval UDE Dat 01/17

PŘÍKLAD 5 – SVAŘOVANÝ PŘÍPOJ

Posuzovaný přípoj včetně zatížení je zobrazen na následujícím obrázku. Přípoj je symetrický podle roviny zy včetně svarů. Velikost těchto svarů bude stanovena výpočtem.



Materiálové charakteristiky

Austenitická korozivzdorná ocel 1.4401:

$f_y = 220 \text{ N/mm}^2$, $f_u = 530 \text{ N/mm}^2$, $E = 200000 \text{ N/mm}^2$ a $G = 76900 \text{ N/mm}^2$.

Předpokládá se, že hodnoty meze kluzu a meze pevnosti svaru budou větší než hodnoty původního materiálu.

Dílčí součinitelé

Dílčí součinitel pro výpočet únosnosti svaru je $\gamma_{M2} = 1,25$.

Dále je ve výpočtech provedena kontrola délky navrženého svaru.

Analýza svařovaného přípoje

Pro návrh jednostranného koutového svaru, jenž je schopen odolávat zatížení znázorněném na předchozím obrázku, je použita pružná analýza, která vede ke konzervativnějším hodnotám únosnosti.

Souřadnice (x_c, y_c, z_c) bodu na svařovaném přípoji respektují pravoúhlý souřadný systém s počátkem v těžišti svařovaného přípoje (v našem případě je přípoj v rovině $y-z$, proto je souřadnice $x_c = 0$).

Hlavním důvodem pružné analýzy je určení velikostí sil ve svaru v nejméně zatížených místech nebo důležitých bodech, často označovaných jako kritické body svaru. Pro řešení svařovaný přípoj je za kritický bod považován nejvíce vzdálený bod od těžiště přípoje.

Vektor působící síly, její excentricity a výsledné ohybové momenty působící na svařovaný přípoj lze vzhledem k těžišti C vyjádřit následovně:

Tabulka 2.2

Část 2.3.1

Část 7.4.1

Tabulka 4.1

EN 1993-1-8

Část 2.5

Působící síla

$$\overline{N}_{w,Ed} = [N_{x,Ed}, N_{y,Ed}, N_{z,Ed}]$$

Excentricita působící síly

$$\overline{e}_N = [e_{xc}, e_{yc}, e_{zc}]$$

(jedná se o souřadnice bodu působení síly)

Ohybové momenty

$$M_{xc,Ed} = e_{yc} N_{z,Ed} - e_{zc} N_{y,Ed}$$

$$M_{yc,Ed} = e_{zc} N_{x,Ed} - e_{xc} N_{z,Ed}$$

$$M_{zc,Ed} = e_{xc} N_{y,Ed} - e_{yc} N_{x,Ed}$$

Lineární pružná analýza přípoje pro obecný případ zatížení vede k následujícím složkám síly na jednotku délky svaru v bodě o souřadnicích (x_c, y_c, z_c) , kde tloušťka svaru je označena a :

$$F_{wx,Ed} = a \left[\frac{N_{x,Ed}}{A_w} + \frac{z_c M_{yc,Ed}}{I_{yc}} - \frac{y_c M_{zc,Ed}}{I_{zc}} \right]$$

$$F_{wy,Ed} = a \left[\frac{N_{y,Ed}}{A_w} + \frac{x_c M_{zc,Ed}}{I_{zc}} - \frac{z_c M_{xc,Ed}}{I_{xc}} \right]$$

$$F_{wz,Ed} = a \left[\frac{N_{z,Ed}}{A_w} + \frac{y_c M_{xc,Ed}}{I_{xc}} - \frac{x_c M_{yc,Ed}}{I_{yc}} \right]$$

Plochu svaru A_w a momenty setrvačnosti I kolem hlavních os svařovaného přípoje lze určit následovně:

$$A_w = \int adl = \sum a_i l_i$$

pro přímé části svaru o délce l_i a tloušťce svaru a_i ,

$$I_{xc} = \int a(y_c^2 + z_c^2) dl$$

$$I_{yc} = \int a(x_c^2 + z_c^2) dl$$

$$I_{zc} = \int a(x_c^2 + y_c^2) dl$$

Za předpokladu stejné tloušťky všech svarů a :

$$\frac{A_w}{a} = \int dl = \sum l_i$$

a pro $x_c = 0$:

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int y_c^2 dl$$

$$\frac{I_{yc}}{a} = \int z_c^2 dl$$

$$\frac{I_{xc}}{a} = \int y_c^2 + z_c^2 dl = \frac{I_{yc}}{a} + \frac{I_{zc}}{a}$$

Návrh svarů

Pro návrh a posouzení svarů v určitém bodě a stanovení potřebné tloušťky svaru lze využít dva následující postupy:

První postup je založen na zjednodušeném stanovení konzervativní hodnoty návrhové smykové pevnosti koutového svaru. Návrhová smyková síla na jednotku délky svaru je v každém bodě definována jako vektorový součet návrhových vnitřních sil na jednotku délky od zatížení působícího na svarový spoj. Návrhová smyková síla na jednotku délky by neměla překročit návrhovou smykovou únosnost na jednotku délky, která se určí jako návrhová smyková únosnost vynásobená tloušťkou svaru. Tento postup neumožňuje zohlednit rozdílnou únosnost svarového spoje v různých směrech.

Druhý postup je založen na porovnání základní návrhové pevnosti svaru s napětím ve svaru vyvolaným působícím zatížením podle Misesovy plasticitní podmínky. Tento postup je nejpřesnější, jelikož umožňuje zohlednit rozdílné velikosti napětí v různých směrech posuzovaného svaru.

1. Zjednodušená metoda

Posouzení únosnosti svaru lze provést podle následující podmínky:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{wx,Ed}^2 + F_{wy,Ed}^2 + F_{wz,Ed}^2} \leq F_{w,Rd} = a f_{vw,d} = a \left(\frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \right)$$

kde:

$f_{vw,d}$ je návrhová smyková pevnost svaru

$F_{w,Rd}$ je návrhová smyková pevnost svaru na jednotku délky svaru tloušťky a

Pro korozivzdornou ocel je $\beta_w = 1,0$

Velikost potřebné tloušťky svaru lze určí podle následujícího vztahu:

$$a \geq \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d}}$$

2. Zpřesněná metoda

U této metody se rozlišují směry a velikosti jednotlivých napětí ve svaru (viz obrázek 4.5 v normě EN 1993-1-8):

- Normálové napětí σ_{\perp} působící kolmo k linii svaru a kolmo k účinné ploše svaru
- Smykové napětí τ_{\parallel} působící rovnoběžně s linií svaru a v rovině účinné plochy svaru
- Smykové napětí τ_{\perp} působící kolmo na linii svaru a v rovině účinné plochy svaru

Normálové napětí σ_{\parallel} působící rovnoběžně s linií svaru se ve výpočtu neuvažuje (svar může popraskat nebo může být přerušovaný).

Velikosti napětí σ_{\perp} , τ_{\parallel} a τ_{\perp} musí při posouzení splňovat následující podmínky:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{a} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}}$$

Pro daný přípoj provedený koutovými svary v rovině není druhá podmínka rozhodující. Může však být rozhodující pro svary s částečným průvarem v případech spojů s úkosy.

Místo přesného stanovení jednotlivých složek napětí v koutovém svaru může být v rovině y-z použita následující kontrola:

$$2F_{w,x}^2 + 2F_{w,y}^2 + 2F_{w,z}^2 + F_{w,y}^2 \cos^2 \theta + F_{w,z}^2 \sin^2 \theta - 2F_{w,x} F_{w,y} \sin \theta + 2F_{w,x} F_{w,z} \cos \theta + 2F_{w,y} F_{w,z} \sin \theta \cos \theta \leq \left(a \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \right)^2$$

Poznámka: Indexy jsou zkráceny jako: $F_{w,x}$ pro $F_{wx,Ed}$ a podobně.

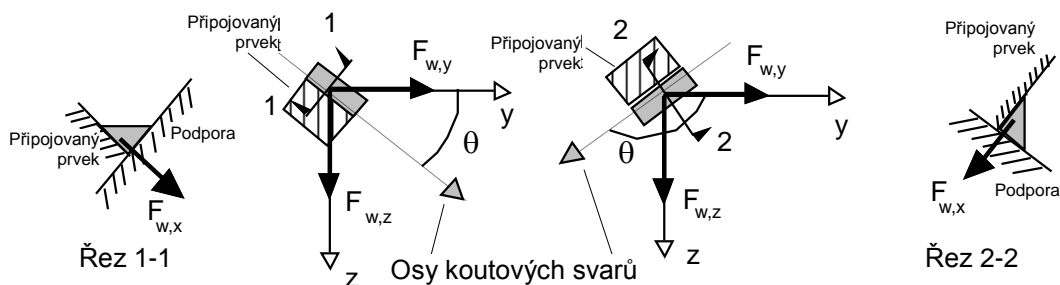
Část 7.4.2

EN 1993-1-8
Část 4.5.3.3

Část 7.4.2

Rov. 7.14 a
7.15

V předchozím uvedeném výrazu je úhel θ mezi osou y a osou svaru jako je znázorněno na obrázku níže:



Jednotlivé složky sil od působícího zatížení v kritickém bodě svaru jsou stanoveny v příloze tohoto příkladu.

1. Zjednodušená metoda

Návrhovou smykovou únosnost svaru pro zjednodušenou metodu lze určit jako:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2} \sqrt{3}} = \frac{530}{1,0 \times 1,25 \times \sqrt{3}} \approx 245 \text{ N/mm}^2$$

Výsledná hodnota působícího zatížení na jednotku délky na svar o tloušťce 1 mm je:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{wx,Ed}^2 + F_{wy,Ed}^2 + F_{wz,Ed}^2} = \sqrt{243^2 + 747^2 + 966^2} = 1245 \text{ N/mm}$$

Minimální potřebná tloušťka svaru je:

$$a \geq \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d}} = \frac{1245}{245} \approx 5,0 \text{ mm}$$

2. Zpřesněná metoda

V bodě (a), kde úhel θ mezi osou y a osou svaru je 0° , musí být splněna podmínka:

$$2F_{wx,Ed}^2 + 3F_{wy,Ed}^2 + 2F_{wz,Ed}^2 + 2F_{wx,Ed}F_{wz,Ed} \leq \left(a \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \right)^2$$

Minimální potřebná tloušťka svaru je:

$$a \geq \frac{\sqrt{2 \times (-243)^2 + 3 \times (747)^2 + 2 \times (966)^2 + 2 \times (-243) \times (966)}}{530 / 1,25} = 4,8 \text{ mm}$$

Tloušťka je zvolena 5 mm po celé délce svaru.

Poznámka: Pokud je délka koutového svaru větší než $150a$, je třeba návrhovou únosnost svaru redukovat součinitelem $\beta_{LW,1}$. Pro daný typ svařovaného přípoje tato redukce nemá takový význam. Pro výpočet $\beta_{LW,1}$ je konzervativně zvolena celá délka svaru a vypočtená tloušťka 5 mm:

$$\beta_{LW,1} = 1,2 - \frac{0,2L_j}{150a} = 1,2 - \frac{0,2 \times 600}{150 \times 5} = 1,04 > 1,0$$

Proto $\beta_{LW,1} = 1,0$.

Je patrné, že použití redukčního součinitele pro návrhovou pevnost svaru není nutné.

EN 1993-1-8:
Rov. 4.4

EN 1993-1-8
Rov. 4.9

Příloha – Výpočet jednotlivých složek sil v kritickém bodě svaru**Geometrické vlastnosti svařovaného přípoje**

Na obou stranách sloupu je proveden identický přípoj, který je i stejně zatížen, proto postačí posoudit pouze přípoj na jedné straně.

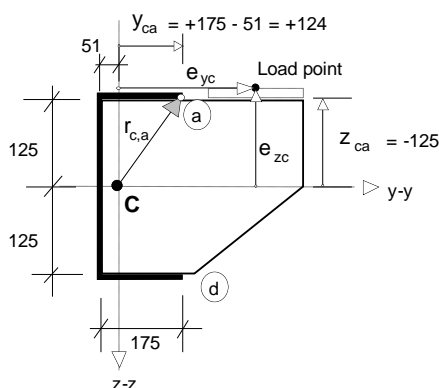
Plocha svaru, těžiště svaru a kritický bod svaru

Účinná plocha svaru je tvořena ze třech přímých úseků o délce L_i a konstantní tloušťky svaru zvolené 1 mm:

$$\frac{A_w}{a} = \frac{a \int ds}{a} = \frac{\sum A_{w,i}}{a} = \frac{\sum a L_{w,i}}{a} = \sum L_i = 2 \times 175 + 250 = 600 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Vzdálenost těžiště od osy svislého svaru přípoje (rovnoběžná s osou z) o konstantní tloušťce svaru a je:

$$\bar{y} = \frac{\sum \bar{y}_i \frac{A_{w,i}}{a}}{\sum \frac{A_{w,i}}{a}} = \frac{\sum \bar{y}_i L_i}{\sum L_i} = \frac{2 \times (87,5 \times 175) + 0 \times 250}{600} \approx 51 \text{ mm}$$



Souřadnice kritického bodu přípoje (a) vzhledem k hlavním osám těžiště C jsou:

$$y_{ca} = +(175 - 51) = +124 \text{ mm} \quad z_{ca} = -125 \text{ mm}$$

Poznámka: Bod (d) může být také vybrán jako potenciální kritický bod, pro který je:

$$y_{ca} = +(175 - 51) = +124 \text{ mm} \quad z_{ca} = +125 \text{ mm}$$

Je však zřejmé, že pro působící zatížení je nejkritičtější bod svaru (a).

Moment setrvačnosti svarového obrazce

Pro jednotlivé svary spoje o tloušťce 1 mm lze moment setrvačnosti stanovit jako:

$$\frac{I_{yc}}{a} = \int z_c^2 ds = 2 \times 175 \times 125^2 + \frac{250^3}{12} = 6,77 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int y_c^2 ds = 250 \times 51^2 + 2 \times \frac{175^3}{12} + 2 \times 175 \times (87,5 - 51)^2 = 2,01 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

Pro „kroucení“ (moment k ose x) je rozhodující následující moment setrvačnosti:

$$I_{xc} = a \int r_c^2 ds = a \int y_c^2 ds + a \int z_c^2 ds = I_{zc} + I_{yc}$$

proto:

$$\frac{I_{xc}}{a} = (6,77 + 2,01) \times 10^6 = 8,78 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

Vnitřní síly

Předpokládá se, že oba přípoje přenáší působící zatížení rovnoměrně.

Jednotlivé složky působící osově a smykové síly jsou:

$$N_{x,Ed} = -\frac{20}{2} = -10 \text{ kN} \quad N_{y,Ed} = +\frac{30}{2} = +15 \text{ kN} \quad N_{z,Ed} = +\frac{300}{2} = +150 \text{ kN}$$

Složky působící osově síly působí na přípoj excentricky, tudíž vyvozují i ohybové momenty. Excentricity tj. souřadnice působišť zatížení jsou:

$$e_{xc} = 0 \text{ (působišť zatížení je uvažováno v rovině přípoje y-z)}$$

$$e_{yc} = 300 - 100 + 175 - 51 = +324 \text{ mm}$$

$$e_{zc} = -140 \text{ mm}$$

Výsledné ohybové momenty jsou:

$$M_{xc,Ed} = e_{yc} N_{z,Ed} - e_{zc} N_{y,Ed} = (+324) \times (+150) - (-140) \times (+15) = +50,7 \text{ kNm}$$

$$M_{yc,Ed} = e_{zc} N_{x,Ed} - e_{xc} N_{z,Ed} = (-140) \times (-10) - (0) \times (+150) = +1,4 \text{ kNm}$$

$$M_{zc,Ed} = e_{xc} N_{y,Ed} - e_{yc} N_{x,Ed} = (0) \times (+15) - (+324) \times (-10) = +3,24 \text{ kNm}$$

Zatížení svaru v kritickém bodě svařovaného přípoje

Pro přípoj v rovině y-z v kritickém bodě (a) jsou jednotlivé složky na jednotku délky svaru stanoveny jako:

$$F_{wx,Ed} = \frac{N_{x,Ed}}{A_w/a} + \frac{z_{ca} M_{yc,Ed}}{I_{yc}/a} - \frac{y_{ca} M_{zc,Ed}}{I_{zc}/a}$$

$$F_{wy,Ed} = \frac{N_{y,Ed}}{A_w/a} - \frac{z_{ca} M_{xc,Ed}}{I_{xc}/a}$$

$$F_{wz,Ed} = \frac{N_{z,Ed}}{A_w/a} - \frac{y_{ca} M_{xc,Ed}}{I_{xc}/a}$$

Jednotlivé příspěvky výsledné síly ve svaru od působící osově síly jsou:

$$F_{w,x}^{N_x} = \frac{N_{x,Ed}}{A_w/a} = \frac{-10}{600} = -17 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,y}^{N_y} = \frac{N_{y,Ed}}{A_w/a} = \frac{+15}{600} = +25 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,z}^{N_z} = \frac{N_{z,Ed}}{A_w/a} = \frac{+150}{600} = +250 \text{ N/mm}$$

Jednotlivé příspěvky výsledné síly ve svaru od ohybových momentů jsou:

$$F_{w,y}^{M_{xc}} = -M_{xc,Ed} \frac{z_{c,a}}{I_{xc}/a} = -50,7 \times 10^6 \times \frac{(-125)}{8,78 \times 10^6} = +722 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,z}^{M_{xc}} = +M_{xc,Ed} \frac{y_{c,a}}{I_{xc}/a} = +50,7 \times 10^6 \times \frac{(+124)}{8,78 \times 10^6} = +716 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,x}^{M_{yc}} = +M_{yc,Ed} \frac{z_{c,a}}{I_{yc}/a} = +1,41 \times 10^6 \times \frac{(-125)}{6,77 \times 10^6} = -26 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,x}^{M_{zc}} = -M_{zc,Ed} \frac{y_{c,a}}{I_{zc}/a} = -3,24 \times 10^6 \times \frac{(+124)}{2,01 \times 10^6} = -200 \text{ N/mm}$$

Kombinací jednotlivých příspěvků osově síly a ohybových momentů v kritickém bodě (a) získáme:

$$F_{wx,Ed} = F_{w,x}^{N_x} + F_{w,x}^{M_y} + F_{w,x}^{M_{zc}} = -17 - 26 - 200 = -243 \text{ N/mm}$$

$$F_{wy,Ed} = F_{w,y}^{N_y} + F_{w,y}^{M_{xc}} = +25 + 722 = +747 \text{ N/mm}$$

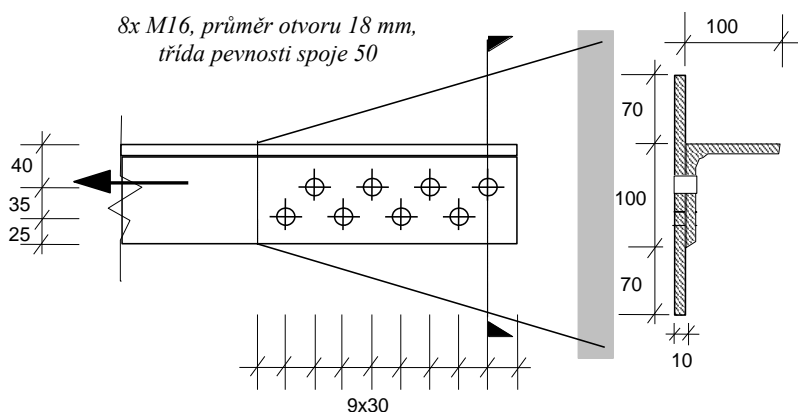
$$F_{wz,Ed} = F_{w,z}^{N_z} + F_{w,z}^{M_{xc}} = +250 + 716 = +966 \text{ N/mm}$$

Výsledné síly ve svaru od působícího zatížení jsou spočteny na jednotku délky pro svar tloušťky 1 mm v celé délce přípoje.

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)	List 1 z 6					
	Název	Příklad 6 – Šroubovaný přípoj				
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	Vypracoval	IR	Dat	10/02
			Revidoval	MEB	Dat	04/06
Revidoval			UDE	Dat	01/17	
PŘÍKLADOVÁ ČÁST						

PŘÍKLAD 6 – ŠROUBOVANÝ PŘÍPOJ

Tažený úhelník o rozměrech 100×100×10 je připojen k plechu o tloušťce 10 mm. Úhelník i plech jsou vyrobeny z korozivzdorné austenitické oceli 1.4401. Úhelník je k plechu připojen z boku osmi šrouby M16 z korozivzdorné austenitické oceli. Jedná se o šroub třídy pevnosti 50 (měkký). Stanovte únosnost přípoje.



Přípoj je kategorie A: Spoje namáhané ve stříhu a v otláčení
Největší návrhové smykové zatížení nemá překročit návrhovou únosnost ve stříhu ani návrhovou únosnost v otláčení.

EN 1993-1-8
Část 3.4.1

Materiálové charakteristiky

Úhelník i plech jsou z korozivzdorné austenitické oceli 1.4401:

$$f_y = 220 \text{ N/mm}^2 \text{ a } f_u = 530 \text{ N/mm}^2$$

Třída pevnosti šroubu 50:

$$f_{yb} = 210 \text{ N/mm}^2 \text{ a } f_{ub} = 500 \text{ N/mm}^2.$$

Tabulka 2.2
Část 2.3.1

Tabulka 2.6

Dílčí součinitelé

V příkladu jsou použity následující součinitelé:

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

Tabulka 4.1

Geometrie přípoje

Pro šrouby M16 je požadována velikost otvoru $d_0 = 18 \text{ mm}$

Krajní rozteč ve směru tahu $e_1 = 30 \text{ mm}$; krajní rozteč kolmo na směr tahu $e_2 = 25 \text{ mm}$

$$e_1 \text{ a } e_2 < 4t + 40 = 4 \times 10 + 40 = 80 \text{ mm a} \\ > 1,2d_0 = 1,2 \times 18 = 21,6 \text{ mm}$$

Část 7.2.3

Pro více řad šroubů platí:

- rozteč mezi šrouby ve směru tahu $p_1 = 60 \text{ mm} > 2,2d_0 = 39,6 \text{ mm}$

- šikmá vzdálenost mezi šrouby:

$$\sqrt{30^2 + 35^2} = 46,1 \text{ mm} > 2,4d_0 = 43,2 \text{ mm}$$

- rozteč mezi šrouby kolmo na směr tahu $p_2 = 35 \text{ mm} > 1,2d_0 = 21,6 \text{ mm}$

Poznámka: V případě tlakem zatíženého přípoje by měly být rozteče kontrolovány s ohledem na případné lokální boulení částí průřezu jak u plechu, tak i úhelníku.

Únosnost průřezu úhelníku v tahu

Průřezová plocha úhelníku $A_g = 1915 \text{ mm}^2$

Návrhová plastická únosnost průřezu:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1915 \times 220}{1,1 \times 10^3} = 383 \text{ kN}$$

Část 7.2.3

Rov. 7.6

Únosnost oslabeného průřezu úhelníku v tahu

Únosnost oslabeného průřezu je třeba kontrolovat pro průřezovou plochu řezu 1 s uvážením jednoho otvoru pro šroub i pro průřezovou plochu řezu 2 s uvážením dvou otvorů pro šrouby. O únosnosti oslabeného průřezu rozhoduje menší plocha:

Část 5.6.4

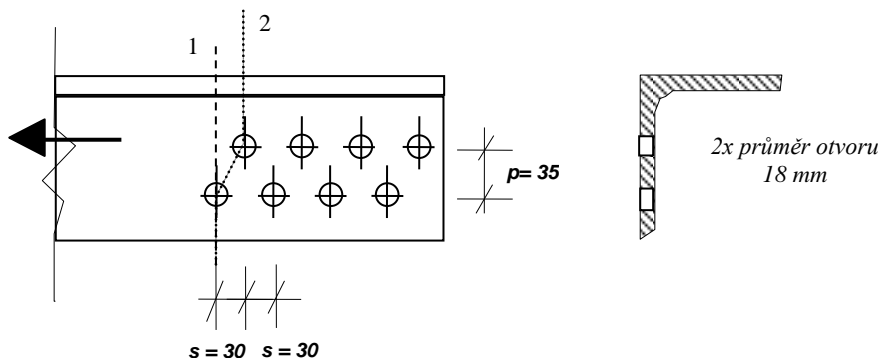
$$A_g - t \left(nd_0 - \sum \left[\frac{s^2}{4p} \right] \right)$$

Velikost průřezové plochy v řezu 1:

$$A_g - td_0 = 1915 - 10 \times 18 = 1735 \text{ mm}^2$$

Velikost průřezové plochy v řezu 2:

$$n = 2, s = 30 \text{ mm a } p = 35 \text{ mm}$$



$$\begin{aligned} A_{net} &= A_g - t \left(nd_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right) = 1915 - 10 \times \left((2 \times 18) - \frac{30^2}{4 \times 35} \right) \\ &= 1915 - 10 \times (36 - 6,4) = 1619 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

O únosnosti rozhoduje průřezová plocha řezu 2 $A_{net} = 1619 \text{ mm}^2$

Redukční součinitel pro úhelníky připojené jedním ramenem je pro víc jak 3 šrouby konzervativně stanoven interpolací jako: $\beta_3 = 0,57$

Tabulka 7.1

Návrhová únosnost oslabeného průřezu úhelníku v tahu:

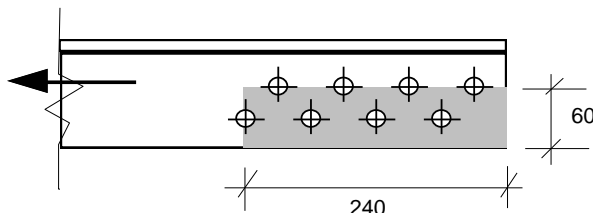
$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,57 \times 1619 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 391 \text{ kN}$$

Část 7.2.3

Rov. 7.10

Návrh úhelníku na vytržení skupiny šroubů

Výpočetní vztahy pro vytržení skupiny šroubů jsou uvažovány podle EN 1993-1-8 (na místo EN 1993-1-1).



Návrhová únosnost ve vytržení skupiny šroubů namáhané excentrickým zatížením s uvážením jednoho otvoru pro šroub:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 530 \times (60 - 18) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 4 \times 18) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3}$$

$$= 89 + 194 = 283 \text{ kN}$$

EN 1993-1-8
Část 3.10.2(3)
Rov. 3.10

Návrhová únosnost ve vytržení skupiny šroubů namáhané excentrickým zatížením s uvážením dvou otvorů pro šroub:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 530 \times (60 - 18 - 9) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 3 \times 18 - 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3}$$

$$= 70 + 204 = 274 \text{ kN}$$

EN 1993-1-8
Část 3.10.2(3)
Rov. 3.10

Únosnost průřezu plechu v tahu

Plocha průřezu v místě posledního šroubu:

$$A_g = 10 \times (100 + 70 + 70) = 2400 \text{ mm}^2$$

Návrhová plastická únosnost průřezu:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2400 \times 220}{1,1 \times 10^3} = 480 \text{ kN}$$

Část 5.7.2

Rov. 5.23

Únosnost oslabeného průřezu plechu v tahu

Plocha průřezu v místě posledního šroubu (v místě největšího působení zatížení) s uvážením jednoho otvoru pro šroub:

Část 5.7.2

$$b = 100 + 70 + 70 = 240 \text{ mm}$$

$$A_{net} = A_g - d_0 t = 2400 - 18 \times 10 = 2220 \text{ mm}^2$$

Plocha průřezu v místě posledního šroubu s uvážením dvou otvorů pro šroub pro rozteče $s = 30 \text{ mm}$ a $p = 35 \text{ mm}$:

$$A_{net} = A_g - 2d_0 t + \frac{s^2 t}{4p} = 2400 - 2 \times 18 \times 10 + \frac{30^2 \times 10}{4 \times 35}$$

$$= 2400 - 360 + 64 = 2104 \text{ mm}^2$$

O únosnosti rozhoduje průřezová plocha s uvážením dvou otvorů pro šroub:

$$A_{net} = 2104 \text{ mm}^2$$

Návrhová únosnost oslabeného průřezu plechu u konce úhelníku:

$$N_{u,Rd} = \frac{kA_{net}f_u}{\gamma_{M2}}$$

Rov. 5.24

Součinitel $k = 1,0$ (pro přesné otvory bez ořepů apod.)

$$N_{u,Rd} = \frac{1,0 \times 2104 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 892 \text{ kN}$$

Doporučuje se zkontrolovat únosnost průřezu i v mezilehlých řezech v podélném směru plechu.

Průřez v místě prvního otvoru pro šroub:

(kde $b = 100 + 30 / 240 \times 140 = 117,5 \text{ mm}$)

$$A_{net} = A_g - d_0 t = 117,5 \times 10 - 18 \times 10 = 995 \text{ mm}^2$$

Tento průřez musí být schopen přenášet zatížení z jednoho šroubu.

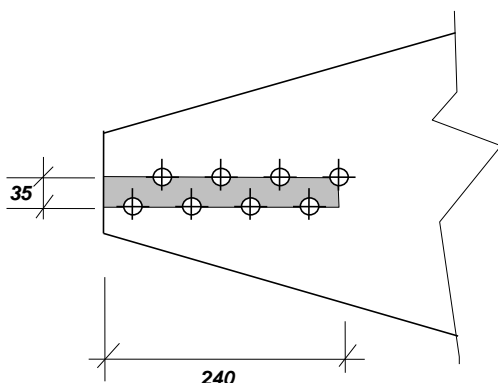
Návrhová únosnost oslabeného průřezu v místě prvního otvoru pro šroub:

$$N_{u,Rd} = \frac{kA_{net}f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{1,0 \times 995 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 421 \text{ kN}$$

Rov. 5.24

Je zřejmé, že další průřez plechu není třeba kontrolovat, jelikož působící zatížení nemůže překročit únosnost samotného úhelníku, která je menší než výše vypočtená hodnota.

Návrh plechu na vytržení skupiny šroubů



Návrhová únosnost ve vytržení skupiny šroubů namáhané centrickým zatížením s uvážením jednoho otvoru pro šroub:

$$\begin{aligned} V_{\text{eff},1,Rd} &= \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \\ &= \frac{530 \times (35 - 9) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 4 \times 18 + 240 - 3 \times 18 - 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3} \\ &= 110,2 + 398,4 = 508 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8
Část 3.10.2(2)
Rov. 3.9

Návrhová únosnost ve vytržení skupiny šroubů namáhané centrickým zatížením s uvážením dvou otvorů pro šroub:

$$\begin{aligned} V_{\text{eff},1,Rd} &= \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \\ &= \frac{530 \times (35 - 2 \times 9) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (2 \times 240 - 6 \times 18 - 2 \times 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3} \\ &= 72,1 + 408,8 = 480 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8
Část 3.10.2(2)
Rov. 3.9

Únosnost šroubů ve smyku

Návrhová únosnost šroubu M16 třídy pevnosti 50 a plochou jádra $A = A_s = 157 \text{ mm}^2$:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$$

Rov. 7.11

Hodnota součinitele α je uvedena v národní příloze. Doporučená hodnota součinitele je 0,6, což platí v případě, kdy smyková rovina prochází závitem.

Část 7.2.4

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \times 500 \times 157}{1,25 \times 10^3} = 37,7 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost skupiny šroubů ve smyku:

$$n_b F_{v,Rd} = 8 \times 37,7 = 302 \text{ kN}$$

Únosnost šroubů v otláčení

Návrhová únosnost šroub v otláčení:

Část 7.2.3

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha_b k_t t d f_u}{\gamma_{M2}}$$

Rov. 7.1

Návrhová únosnost v otláčení pro tloušťku $t = 10 \text{ mm}$ a pro šroub M16 na konci.

Krajní rozteč ve směru tahu $e_1 = 30 \text{ mm}$, krajní rozteč kolmo na směr tahu $e_2 = 25 \text{ mm}$ ($> 1,2d_0 = 21,6 \text{ mm}$), rozteče mezi šrouby $p_1 = 60 \text{ mm}$ a $p_2 = 35 \text{ mm}$.

Šroubové spoje jsou rozděleny do dvou skupin na základě tloušťky připojovaných částí přípoje. Pro tloušťku připojovaných částí větší než 4 mm se jedná o tlustý spoj (deformace není pro tento typ spoje rozhodujícím kritériem návrhu). V případě tlouštěk menších než 4 mm se jedná o tenký spoj.

Část 7.2.3

V tomto případě se jedná o tlustý spoj ($t = 10 \text{ mm}$).

Pro šroub na konci – $e_1 = 30 \text{ mm}$ a $p_1 = 60 \text{ mm}$ – součinitel otláčení α_b ve směru zatížení lze stanovit následovně:

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{e_1}{3d_0} \end{array} \right\}$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{30}{3 \times 18} = 0,556 \end{array} \right\} = 0,556$$

Součinitel otláčení k_t kolmo na směr zatížení lze stanovit následovně:

$$k_t = \left\{ \begin{array}{ll} 1,0 & \text{for } \left(\frac{e_2}{d_0} \right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{for } \left(\frac{e_2}{d_0} \right) \leq 1,5 \end{array} \right\}$$

$$k_t = 0,8 \quad \text{for } \frac{e_2}{d_0} = \frac{25}{18} = 1,39 \leq 1,5$$

Návrhová únosnost koncového šroubu v otláčení je:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha_b k_t t d f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \times 0,556 \times 0,8 \times 10 \times 16 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 75,44 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost skupiny šroubů v otláčení:

$$n_b F_{b,Rd} = 8 \times 75,44 = 604 \text{ kN}$$

Rov. 7.1

Návrhová únosnost přípoje při MSÚ

Únosnost průřezu úhelníku v tahu	$N_{pl,Rd}$	383 kN
Únosnost oslabeného průřezu úhelníku v tahu	$N_{u,Rd}$	391 kN
Návrh úhelníku na vytržení skupiny šroubů (s uvážením jednoho otvoru)	$V_{eff,2,Rd}$	283 kN
Návrh úhelníku na vytržení skupiny šroubů (s uvážením dvou otvorů)	$V_{eff,2,Rd}$	274 kN
Únosnost průřezu plechu v tahu	$N_{pl,Rd}$	480 kN
Únosnost oslabeného průřezu plechu v tahu	$N_{u,Rd}$	892 kN
Návrhová únosnost oslabeného průřezu v místě prvního otvoru pro šroub	$N_{u,Rd}$	421 kN
Návrh plechu na vytržení skupiny šroubů (s uvážením jednoho otvoru)	$V_{eff,1,Rd}$	508 kN
Návrh plechu na vytržení skupiny šroubů (s uvážením dvou otvorů)	$V_{eff,1,Rd}$	480 kN
Návrhová únosnost skupiny šroubů ve smyku	$F_{v,Rd}$	302 kN
Návrhová únosnost skupiny šroubů v otláčení	$F_{b,Rd}$	604 kN

Nejmenší únosnost je vypočtena pro vytržení skupiny šroubů v úhelníku namáhané excentrickým zatížením s uvážením dvou otvorů pro šroub:

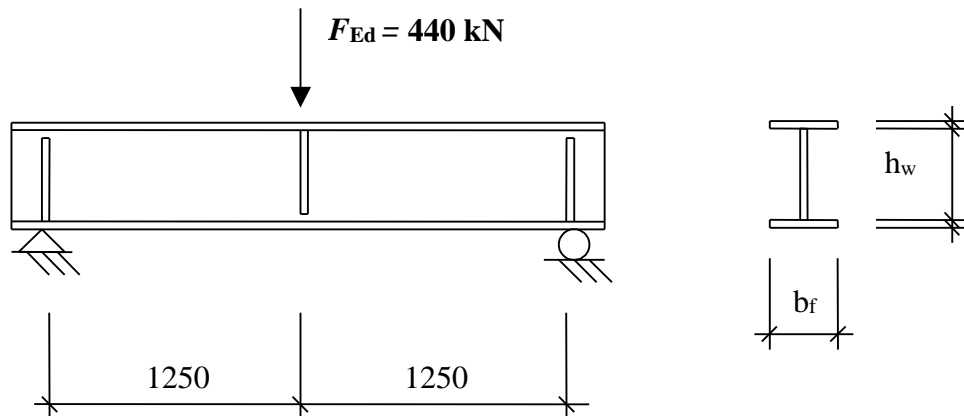
$$V_{eff,2,Rd} = 274 \text{ kN}$$

Poznámka: Pro návrh šroubů je rozhodující únosnost ve smyku ($F_{v,Rd} = 302 \text{ kN}$).

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST) PŘÍKLADOVÁ ČÁST	List 1 z 5					
	Název	Příklad 7 – Smyková únosnost nosníku				
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	Vypracoval	AO	Dat	06/02
			Revidoval	MEB	Dat	04/06
		Revidoval	ER/IA	Dat	04/17	

PŘÍKLAD 7 – SMYKOVÁ ÚNOSNOST NOSNÍKU

Navrhněte nosník s ohledem na smykovou únosnost, který je na obou koncích prostě podepřen. Tvar průřezu a rozpon nosníku jsou zřejmé z obrázku. Horní pásnice je příčně podepřena po celé délce nosníku.



Materiálové charakteristiky

Nosník je z austeniticko-feritické korozivzdorné oceli 1.4162:

$$f_y = 480 \text{ N/mm}^2 \text{ pro pás válcovaný za tepla}$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

Geometrie navrženého průřezu

Pásnice:	12 × 200 mm ²
Stojina:	4 × 500 mm ²
Výztuhy:	12 × 98 mm ²
Tloušťka svaru:	4 mm

Vnitřní síly

Maximální smyková síla a maximální ohybový moment je vypočten následovně:

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{440}{2} = 220 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}L}{4} = \frac{440 \times 2,5}{4} = 275 \text{ kNm}$$

Dílčí součinitele

$$\gamma_{M0} = 1,1$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

Zatřídění průřezu

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{480} \times \frac{200}{210}} = 0,683$$

Tabulka 2.2
Část 2.3.1

Tabulka 4.1

Část 5.3
Tabulka 5.2

Příklad 7	List 2 z 5
<p>Stojina - část namáhaná ohybem:</p> $\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{500 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{4 \times 0,683} = 178,9 > 90, \text{ proto je stojina třídy 4}$	Tabulka 5.2
<p>Pásnice - část namáhaná tlakem:</p> $\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{200 - 4 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{2 \times 12 \times 0,683} = 11,3 \leq 14,0, \text{ proto je pásnice třídy 3}$ <p>Celkově je průřez třídy 4</p>	Tabulka 5.2
<p>Únosnost ve smyku</p> <p>Smykové boulení u vyztužených stěn je třeba posoudit v případě, kdy</p> $h_w / t_w \geq \frac{24,3}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau}$	Část 6.4.3
<p>$a/h_w = 1250/500 = 2,5 > 1$, pro stojinu bez podélné výztuhy je $k_{\text{tst}}=0$, proto:</p> $k_\tau = 5,34 + 4 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 = 5,34 + 4 \left(\frac{500}{1250} \right)^2 = 5,98$	Rov. 6.26
<p>Podle EN 1993-1-4 je doporučeno $\eta=1,2$</p> $h_w/t_w = \frac{500}{4} = 125 \geq \frac{24,3}{1,2} \times 0,683 \times \sqrt{5,98} = 33,8$	Část 6.4.3
<p>Proto je nutné posoudit návrhovou únosnost ve smyku jako:</p> $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \times 480 \times 500 \times 4}{\sqrt{3} \times 1,1} \times 10^{-3} = 604,6 \text{ kN}$	Rov. 6.22
$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$	Rov. 6.23
<p>Pro netuhou koncovou výztuhu platí:</p> $\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right) = \left(\frac{500}{37,4 \times 4 \times 0,683 \times \sqrt{5,98}} \right) = 2,00 > 0,65$	Rov. 6.25
$\chi_w = \frac{1,19}{(0,54 + \bar{\lambda}_w)} \quad \text{pro } \bar{\lambda}_w \geq 0,65$	Tabulka 6.3
<p>Příspěvek stojiny lze stanovit jako:</p> $\chi_w = \frac{1,19}{(0,54 + 2,00)} = 0,468$	Tabulka 6.3
$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,468 \times 480 \times 500 \times 4}{\sqrt{3} \times 1,1} \times 10^{-3} = 235,9 \text{ kN}$	Rov. 6.23
<p>Pokud únosnost pásnic není pro ohybový moment plně využita lze příspěvek pásnic uvažovat ve výpočtu únosnosti ve smyku. Moment únosnosti průřezu sestávajícího se pouze z účinné plochy pásnic lze stanovit jako:</p>	Část 6.4.3
$M_{f,Rd} = 12 \times 200 \times \frac{480}{1,1} \times (500 + 12) \times 10^{-6} = 536,2 \text{ kNm}$ <p>$M_{f,Rd} > M_{Ed} = 275 \text{ kNm}$, tudíž lze uvažovat příspěvek pásnic ve výpočtu únosnosti ve smyku</p>	

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

Rov. 6.29

$$c = a \left[0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right] \text{ ale } \frac{c}{a} \leq 0,65$$

Rov. 6.30

$$= 1250 \times \left[0,17 + \frac{3,5 \times 200 \times 12^2 \times 480}{4 \times 500^2 \times 480} \right] = 338,5 \text{ mm}$$

$$338,5 \text{ mm} < 0,65 \times 1250 = 812,5 \text{ mm}$$

$$V_{bf,Rd} = \frac{200 \times 12^2 \times 480}{338 \times 1,1} \times \left[1 - \left[\frac{275}{536,2} \right]^2 \right] = 27,4 \text{ kN}$$

Rov. 6.29

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 235,8 + 27,4 = 263,2 \text{ kN} \leq 604,6 \text{ kN}$$

Rov. 6.22

Posouzení příčných výztuh

Část 6.4.5

Příčné výztuhy musí být posouzeny na únosnost v prostém i vzpěrném tlaku s použitím $\alpha = 0,49$ a $\bar{\lambda}_0 = 0,2$. Účinný průřez příčné výztuhy se skládá ze samotné výztuhy a části stojiny o šířce $11\epsilon t_w$ uvažované na obě strany od výztuhy v podélném směru stojiny. Takto stanovený účinný průřez výztuhy spadá do třídy průřezu 3.

Tabulka 6.1

$a/h_w = 1250/500 = 2,5 \geq \sqrt{2}$, moment setrvačnosti mezilehlé výztuhy musí splňovat podmínku:

Rov. 6.51

$$I_{st} \geq 0,75 h_w t_w^3 = 0,75 \times 500 \times 4^3 = 24000 \text{ mm}^4$$

Rov. 6.51

$$I_{st} = 2 \times \frac{(11 \times 0,683 \times 4) \times 4^3}{12} + \frac{12 \times 200^3}{12} = 8,00 \times 10^6 \text{ mm}^4 \text{ (podmínka je splněna)}$$

Únosnost účinného průřezu výztuhy v prostém tlaku:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0}$$

Rov. 5.27

$$A_g = (12 \times 200 + 11 \times 0,683 \times 4 \times 2) = 2460,1 \text{ mm}^2$$

$$N_{c,Rd} = 2460,1 \times 480 \times 10^{-3} / 1,1 = 1073,5 \text{ kN}$$

Únosnost účinného průřezu výztuhy ve vzpěrném tlaku:

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

Rov. 6.2

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

Rov. 6.4

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

Rov. 6.5

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_{yw}}{E}}$$

Rov. 6.6

$$L_{cr} = 0,75 h_w = 0,75 \times 500 = 375 \text{ mm}$$

Část 6.4.5

$$\bar{\lambda} = \frac{375}{\sqrt{\frac{8 \times 10^6}{2460,1}}} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{480}{200000}} = 0,103$$

Rov. 6.6

$$\phi = 0,5 \times \left(1 + 0,49 \times (0,103 - 0,2) + 0,103^2 \right) = 0,48$$

Rov. 6.5

$$\chi = \frac{1}{0,48 + [0,48^2 - 0,103^2]^{0,5}} = 1,05 > 1 \Rightarrow \chi = 1,0$$

Rov. 6.4

Z výpočtu je zřejmé, že $N_{b,Rd} = N_{c,Rd} = 1073,5 \text{ kN} > N_{Ed}$, tudíž navržená výztuha vyhoví.

Interakce mezi smykovou silou a ohybovým momentem

Pokud $\bar{\eta}_3$ nepřesáhne 0,5, není nutné návrhovou únosnost pro ohybový moment a osovou sílu redukovat s ohledem na vliv smykové síly:

Část 6.4.3

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1,0$$

Rov. 6.36

$$\bar{\eta}_3 = \frac{220}{235,9} = 0,933 > 0,5, \text{ proto je zapotřebí vzít v úvahu interakci namáhání}$$

Podmínkou je:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \text{ pro } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

Rov. 6.34

kde:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

Rov. 6.35

$M_{f,Rd} = 536,2 \text{ kNm}$ (list 3)

$M_{pl,Rd}$ je plastická únosnost neredukovaného průřezu

$$M_{pl,Rd} = M_{f,Rd} + \frac{t_w h_w^2 f_y}{4 \gamma_{M0}} = 536,2 + \frac{4 \times 500^2 \times 480}{4 \times 1,1 \times 10^6} = 645,3 \text{ kNm}$$

Posouzení:

$M_{Ed} = 275 \text{ kNm}$, a tedy:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{275}{645,3} = 0,426 \leq 1,0 \text{ OK}$$

Rov. 6.35

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 = 0,426 + \left(1 - \frac{536,2}{645,3}\right) \times (2 \times 0,933 - 1)^2 = 0,553 < 1,0$$

Z předchozích výpočtů je zřejmé, že navržený nosník vyhoví při smyku i při interakci smykové síly a ohybového momentu.

Výpočet charakteristik účinného průřezu

Pásnice je třídy 3, proto se neredukuje.

Výška stojiny je redukována součinitelem ρ (pro vnitřní tlačené části - svařování):

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

Rov. 5.1

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \text{ kde } \bar{b} = d = 500 - 2 \times 4 \times \sqrt{2} = 488,68 \text{ mm}$$

Rov. 5.3

Za předpokladu lineární rozložení napětí po výšce stojiny platí:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$$

$$\Rightarrow k_{\sigma} = 23,9$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{488,68/4}{28,4 \times 0,683 \times \sqrt{23,9}} = 1,29$$

$$\rho = \frac{0,772}{1,29} - \frac{0,079}{1,29^2} = 0,55 \leq 1$$

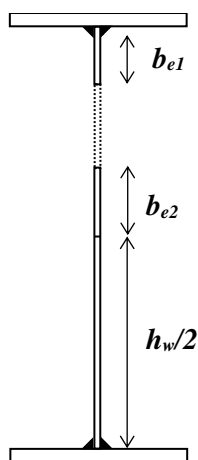
$$b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi) = 0,55 \times 488,68 / (1 - (-1)) = 134,76 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 b_{\text{eff}} = 0,4 \times 134,76 = 53,9 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 b_{\text{eff}} = 0,6 \times 134,76 = 80,9 \text{ mm}$$

Výpočet momentu setrvačnosti účinného průřezu

e_i je kladný směr od středu horní pásnice směrem dolů



$$A_{\text{eff}} = \sum_i A_i = b_f t_f \times 2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2}) t_w + b_{e2} t_w + (h_w / 2) t_w = 6361,7 \text{ mm}^2$$

$$e_{\text{eff}} = \frac{1}{A_{\text{eff}}} \sum_i A_i e_i = \frac{1}{A_{\text{eff}}} [b_f t_f (0) + b_f t_f (h_w + t_f)] + \frac{1}{A_{\text{eff}}} [(b_{e1} + 4\sqrt{2}) t_w (0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)) + b_{e2} t_w (0,5(h_w + t_f) - b_{e2} / 2) + (h_w / 2) t_w (0,75 h_w + 0,5 t_f)] = 266,4 \text{ mm}$$

$$I_{\text{eff}} = \sum_i I_i + \sum_i A_i (e_{\text{eff}} - e_i)^2 = 2 \times \frac{b_f t_f^3}{12} + \frac{t_w (b_{e1} + 4\sqrt{2})^3}{12} + \frac{t_w b_{e2}^3}{12} + \frac{t_w (h_w / 2)^3}{12} + b_f t_f (e_{\text{eff}} - 0)^2 + b_f t_f [e_{\text{eff}} - (h_w + t_f)]^2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2}) t_w [e_{\text{eff}} - 0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)]^2 + b_{e2} t_w [e_{\text{eff}} - 0,5(h_w + t_f - b_{e2})]^2 + (h_w / 2) t_w [e_{\text{eff}} - (0,75 h_w + 0,5 t_f)]^2 = 3,472 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

Tabulka 5.3

Rov. 5.3

Rov. 5.1

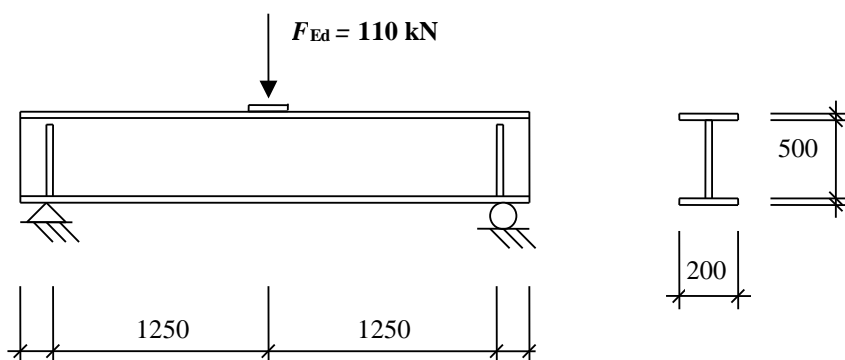
Tabulka 5.3

Tabulka 5.3

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)	List 1 z 5			
	Název	Příklad 8 – Únosnost nosníku zatíženého koncentrovanou silou		
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	Vypracoval AO	Dat 06/02
			Revidoval MEB	Dat 04/06
		Revidoval ER/IA	Dat 04/17	
PŘÍKLADOVÁ ČÁST				

PŘÍKLAD 8 – ÚNOSNOST NOSNÍKU ZATÍŽENÉHO KONCENTROVANOU SILOU

Existující nosník vystavený rovnoměrnému spojitému zatížení je rekonstruován a následně bude zatížen koncentrovanou silou. Zkontrolujte, zda nosník přenesete tuto sílu. Tloušťka roznášecí desky je 12 mm. Nosník je na obou koncích prostě podepřen. Tvar průřezu a rozpon nosníku je zřejmý z obrázku. Horní pásnice je příčně podepřena po celé délce nosníku.



Materiálové charakteristiky

Nosník je z austeniticko-feritické korozivzdorné oceli 1.4462:

$$f_y = 460 \text{ N/mm}^2 \text{ pro pás válcovaný za tepla}$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

Geometrie navrženého průřezu

Pásnice: $12 \times 200 \text{ mm}^2$

Stojina: $4 \times 500 \text{ mm}^2$

Výztuhy: $12 \times 98 \text{ mm}^2$

Tloušťka krčního svaru: 4 mm

Vnitřní síly

Maximální smyková síla a maximální ohybový moment je vypočten následovně:

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{110}{2} = 55 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}L}{4} = \frac{110 \times 2,5}{4} = 68,75 \text{ kNm}$$

Dílčí součinitelé

$$\gamma_{M0} = 1,1$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

Zatřídění průřezu

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{460} \times \frac{200}{210}} = 0,698$$

Tabulka 2.2
Část 2.3.1

Tabulka 4.1

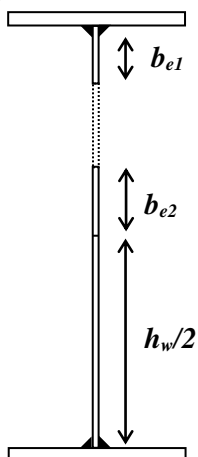
Část 5.3

Tabulka 5.2

Příklad 8	List 2 z 5
<p>Stojina - část namáhaná ohybem:</p> $\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{500 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{4 \times 0,698} = 175,1 > 90, \text{ proto je stojina třídy 4}$	Tabulka 5.2
<p>Pásnice - část namáhaná tlakem:</p> $\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{200 - 4 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{2 \times 12 \times 0,698} = 11,0 \leq 14,0, \text{ proto je pásnice třídy 3}$ <p>Celkově je průřez třídy 4</p>	Tabulka 5.2
<p>Únosnost v lokálním boulení při zatížení příčnými silami</p>	Část 6.4.4
<p>Návrhové zatížení by nemělo přesáhnout návrhovou únosnost, která se určí následovně:</p>	
$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1}$	Rov. 6.37
<p>Účinná délka pro únosnost na příčné síly L_{eff} se určí ze vztahu:</p>	
$L_{eff} = \chi_F l_y$	Rov. 6.45
<p>kde součinitel lokálního boulení je:</p>	
$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0$	Rov. 6.46
<p>kde příslušnou štíhlost lze stanovit ze vztahu:</p>	
$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}}$	Rov. 6.47
<p>kde účinná zatížená délka se stanoví jako:</p>	
$l_y = s_s + 2t_f (1 + \sqrt{m_1 + m_2})$	Rov. 6.41
<p>kde s_s je roznášecí délka na pásnici; m_1 a m_2 jsou bezrozměrné parametry:</p>	
$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w}$	Rov. 6.38
$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{pro } \bar{\lambda}_F > 0,5$	Rov. 6.39
$m_2 = 0 \quad \text{pro } \bar{\lambda}_F \leq 0,5$	Rov. 6.40
<p>s_s je konzervativně uvažována jako dvojnásobek tloušťky roznášecí desky, což je 24 mm.</p>	Výraz 6.5
$m_1 = \frac{460 \times 200}{460 \times 4} = 50$	Rov. 6.38
$m_2 = 0,02 \times \left[\frac{500}{12} \right]^2 = 34,7, \text{ za předpokladu že } \bar{\lambda}_F > 0,5$	Rov. 6.39
$l_y = 24 + 2 \times 12 \times (1 + \sqrt{50 + 34,7}) = 268,9 \text{ mm}$	Rov. 6.41
<p>Kritickou sílu lze stanovit ze vztahu:</p>	
$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w}$	Rov. 6.48
<p>kde součinitel boulení pro daný způsob zatížení – typ (a) – lze stanovit ze vztahu:</p>	
$k_F = 6 + 2 \left[\frac{h_w}{a} \right]^2 = 6 + 2 \times \left[\frac{500}{2500} \right]^2 = 6,08$	Výraz 6.4

Příklad 8	List 3 z 5
$F_{cr} = 0,9 \times 6,08 \times 200000 \times \frac{4^3}{500} \times 10^{-3} = 140,1 \text{ kN}$	Rov. 6.48
$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{268,9 \times 4 \times 460}{140,1 \times 10^3}} = 1,88 > 0,5 \text{ (předpoklad splněn)}$	Rov. 6.47
$\chi_F = \frac{0,5}{1,88} = 0,27 \leq 1,0, \text{ OK}$	Rov. 6.46
$L_{eff} = 0,27 \times 268,9 = 72,6 \text{ mm}$	
$F_{Ed} = 110 \leq 460 \times 72,6 \times 4 / (1,1 \times 10^3) = 121,4 \text{ kN}$	Rov. 6.37
Stojina má dostatečnou únosnost v lokálním boulení při zatížení příčnými silami.	
Interakce mezi příčnou silou, ohybovým momentem a osovou silou	
Interakce mezi příčnou silou, ohybovým momentem a osovou silou je kontrolována v souladu s normou EN1993-1-5:2006.	
$0,8 \times \eta_1 + \eta_2 \leq 1,4$	EN 1993-1-5, Rov. 7.2
kde:	
$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} e_N}{f_y W_{eff} / \gamma_{M0}} \leq 1,0$	EN 1993-1-5, Rov. 4.14
$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1}} \leq 1,0$	EN 1993-1-5, Rov. 6.14
Výpočet charakteristik účinného průřezu	
Pásnice je třídy 3, proto se neredukuje.	
Výška stojiny je redukována součinitelem ρ (pro vnitřní tlačené části - svařování):	
$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1$	Rov. 5.1
$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \text{ kde } b = d = 500 - 2 \times 4 \times \sqrt{2} = 488,68 \text{ mm}$	Rov. 5.3
Za předpokladu lineárního rozložení napětí po výšce stojiny platí:	
$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$	
$\Rightarrow k_\sigma = 23,9$	Tabulka 5.3
$\bar{\lambda}_p = \frac{488,68/4}{28,4 \times 0,698 \times \sqrt{23,9}} = 1,26$	
$\rho = \frac{0,772}{1,26} - \frac{0,079}{1,26^2} = 0,562 \leq 1$	
$b_{eff} = \rho b_c = \rho b / (1 - \psi) = 0,562 \times 488,68 / (1 - (-1)) = 137,3 \text{ mm}$	Tabulka 5.3
$b_{e1} = 0,4 b_{eff} = 0,4 \times 137,3 = 54,9 \text{ mm}$	
$b_{e2} = 0,6 b_{eff} = 0,6 \times 137,3 = 82,4 \text{ mm}$	

e_i je kladný směr od středu horní pásnice směrem dolů



$$A_{\text{eff}} = \sum_i A_i = b_f t_f \times 2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2})t_w + b_{e2}t_w + (h_w/2)t_w = 6372,2 \text{ mm}^2$$

$e_{\text{eff}} =$

$$\frac{1}{A_{\text{eff}}} \sum_i A_i e_i = \frac{1}{A_{\text{eff}}} [b_f t_f (0) + b_f t_f (h_w + t_f)] + \frac{1}{A_{\text{eff}}} [(b_{e1} + 4\sqrt{2})t_w (0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)) + b_{e2}t_w (0,5(h_w + t_f) - b_{e2}/2) + (h_w/2)t_w (0,75h_w + 0,5t_f)] = 266,4 \text{ mm}$$

$$I_{\text{eff}} = \sum_i I_i + \sum_i A_i (e_{\text{eff}} - e_i)^2 = 2 \times \frac{b_f t_f^3}{12} + \frac{t_w (b_{e1} + 4\sqrt{2})^3}{12} + \frac{t_w b_{e2}^3}{12} + \frac{t_w (h_w/2)^3}{12} + b_f t_f (e_{\text{eff}} - 0)^2 + b_f t_f [e_{\text{eff}} - (h_w + t_f)]^2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2})t_w [e_{\text{eff}} - 0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)]^2 + b_{e2}t_w [e_{\text{eff}} - 0,5(h_w + t_f - b_{e2})]^2 + (h_w/2)t_w [e_{\text{eff}} - (0,75h_w + 0,5t_f)]^2 = 3,475 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{eff}}}{e_{\text{eff}} + 0,5t_f} = 1,293 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\eta_1 = \frac{68,75 \times 10^6}{460 \times 1,293 \times 10^6 / 1,1} = 0,127$$

$$\eta_2 = \frac{110}{119,63} = 0,919$$

$$0,8\eta_1 + \eta_2 = 0,8 \times 0,1293 + 0,919 = 1,021 < 1,4$$

Navržený nosník na interakce mezi příčnou silou, ohybovým momentem a osovou silou vyhoví.

Únosnost ve smyku

Smykové boulení u nevyztužených stěn je třeba posoudit v případě, kdy $h_w/t_w \geq \frac{56,2}{\eta} \varepsilon$

$$h_w/t_w = \frac{500}{4} = 125 \geq \frac{56,2}{1,2} \times 0,698 = 32,7$$

Návrhovou únosnost ve smyku je třeba posoudit následovně:

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{b_f,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

EN 1993-1-5
Rov. 4.14

EN 1993-1-5
Rov. 6.14

Část 6.4.3

Rov. 6.20

Rov. 6.22

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

Eq. 6.23

Pro netuhé koncové výztuhy pouze nad podporami je:

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \right) = \left(\frac{500}{86,4 \times 4 \times 0,698} \right) = 2,07 > 0,65$$

Eq. 6.24

$$\chi_w = \frac{1,19}{0,54 + \bar{\lambda}_w} \quad \text{for } \bar{\lambda}_w \geq 0,65$$

Table 6.3

$$\chi_w = \frac{1,19}{0,54 + 2,07} = 0,455$$

Table 6.3

Pokud únosnost pásnic není pro ohybový moment plně využita lze uvažovat příspěvek pásnic ve výpočtu únosnosti ve smyku. Nicméně příspěvek pásnic je poměrně malý, proto je ve výpočtu zanedbán, tj. $V_{bf,Rd} = 0$.

Návrhovou únosnost ve smyku lze tedy stanovit jako:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} = \frac{0,455 \times 460 \times 500 \times 4}{1,1 \times \sqrt{3}} \times 10^{-3} = 219,8 \text{ kN} < \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 579,45 \text{ kN}$$

Eq. 6.23

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} > V_{Ed} = 55 \text{ kN}$$

Nosník na únosnost ve smyku vyhoví.

Interakce mezi smykovou silou a ohybovým momentem

Pokud $\bar{\eta}_3$ nepřesáhne hodnotu 0,5, není nutné návrhovou únosnost pro ohybový moment a osovou sílu redukovat s ohledem na vliv smykové síly:

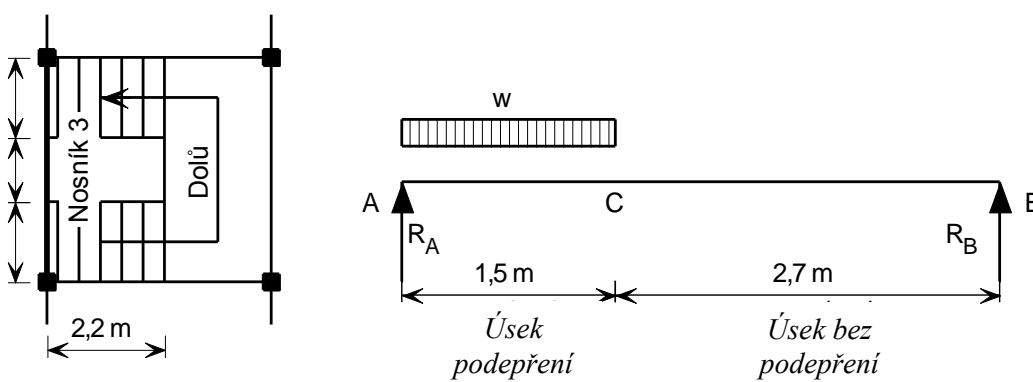
$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1,0$$

Eq. 6.36

$$= \frac{55}{219,8} = 0,25 \leq 0,5, \text{ proto není zapotřebí vzít v úvahu interakci namáhání}$$

Závěr

Únosnost nosníku je vyhovující. Ve výpočtu nebyla ověřena únosnost příčných výztuh nosníku nad podporami. Toto posouzení by mělo být provedeno podle postupu uvedeném v příkladu 7.

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST) PŘÍKLADOVÁ ČÁST	List 1 z 7													
	Název	Příklad 9 – Nosník s tlačnou pásnicí částečně podepřenou proti klopení												
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	<table border="1"> <tr> <td>Vypracoval</td> <td>SMH</td> <td>Dat</td> <td>09/01</td> </tr> <tr> <td>Revidoval</td> <td>NRB</td> <td>Dat</td> <td>04/06</td> </tr> <tr> <td>Revidoval</td> <td>SJR</td> <td>Dat</td> <td>04/17</td> </tr> </table>	Vypracoval	SMH	Dat	09/01	Revidoval	NRB	Dat	04/06	Revidoval	SJR	Dat
Vypracoval	SMH	Dat	09/01											
Revidoval	NRB	Dat	04/06											
Revidoval	SJR	Dat	04/17											
PŘÍKLAD 9 – NOSNÍK S TLAČNOU PÁSNICÍ ČÁSTEČNĚ PODEPŘENOU PROTI KLOPENÍ Je navržen nosník z otevřeného C-průřezu podpírající schodišťové rameno. Celkový rozpon nosníku je 4,2 m a je na obou koncích prostě uložený na sloupy. Mezi body A až C je horní pásnice nosníku příčně podepřena proti klopení a dále mezi body C a B je horní pásnice bez příčného podepření.														
														
Zatížení Předpokládá se, že nosník přenáší zatížení pouze od prvního sestupného ramene schodiště, tedy od prvního schodišťového stupně po mezipodestu. Stálé ztížení (G): Zatížení od vl. tíhy schodiště $1,0 \text{ kN/m}^2 = 1,0 \times 2,2 = 2,2 \text{ kN/m}$ Vlastní tíha nosníku $0,13 \text{ kN/m}$ Proměnné zatížení (Q): Užitné zatížení $4 \text{ kN/m}^2 = 4,0 \times 2,2 = 8,8 \text{ kN/m}$ Kombinace zatížení pro mezní stav únosnosti (MSÚ): $\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$ Jelikož v příkladu vystupuje pouze jedno proměnné zatížení ($Q_{k,1}$), poslední výraz může být dále vynechán. $\gamma_{G,j} = 1,35$ (nepříznivý účinek) $\gamma_{Q,1} = 1,50$														
<u>Návrhové zatížení</u> Stálé zatížení: Zatížení od vl. tíhy schodiště $= 1,35 \times 2,2 = 2,97 \text{ kN/m}$ Vlastní tíha nosníku $= 1,35 \times 0,13 = 0,18 \text{ kN/m}$ Proměnné zatížení: Užitné zatížení $= 1,5 \times 8,8 = 13,2 \text{ kN/m}$														
Vnitřní síly Reakce v místech podpor: $R_A + R_B = (2,97 + 13,2) \times 1,5 + 0,18 \times 4,2 = 25,01 \text{ kN}$														

Pro ohybový moment kolem bodu A platí:

$$R_B = \frac{1,5 \times (2,97 + 13,2) \times 0,75 + 0,18 \times 4,2 \times (4,2/2)}{4,2} = 4,71 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow R_A = 25,01 - 4,71 = 20,30 \text{ kN}$$

Maximální ohybový moment je ve vzdálenosti: $1,5 \times \left(1 - \frac{1,5}{2 \times 4,2}\right) = 1,23 \text{ m}$ od bodu A.

$$M_{Ed,max} = 20,30 \times 1,23 - (2,97 + 13,2) \times \frac{1,23^2}{2} - 0,18 \times \frac{1,23^2}{2} = 12,60 \text{ kNm}$$

Maximální smyková síla je v bodě A:

$$F_{Ed,max} = 20,30 \text{ kN}$$

Materiálové charakteristiky

korozivzdorná austenitická ocel 1.4401

pro plastickou deformaci 0,2 % = 240 N/mm² (pro pás válcovaný za studena)

$$f_y = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2 \text{ a } G = 76900 \text{ N/mm}^2$$

\Rightarrow Návrh: C-průřez 200 × 75, tloušťka $t = 5 \text{ mm}$.

Průřezové charakteristiky

$$I_y = 9,456 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 94,56 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I_z = 0,850 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{pl,y} = 112,9 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I_w = 5085 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A_g = 1650 \text{ mm}^2$$

$$I_t = 1,372 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Zatřídění průřezu

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{240} \times \frac{200000}{210000}} = 0,97$$

Konzervativně uvažujeme, že $c = h - 2t = 200 - 2 \times 5 = 190 \text{ mm}$ pro stojinu

$$\text{Stojina – ohýbaná část: } \frac{c}{t} = \frac{190}{5} = 38$$

Pro třídu 1 je splněna podmínka, $\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon = 69,8$, proto je stojina třídy 1.

$$\text{Pásnice – přečnávající část v tlaku: } \frac{c}{t} = \frac{75}{5} = 15$$

Pro třídu 3 není splněna podmínka, $\frac{c}{t} \leq 14\varepsilon = 13,6$, proto je pásnice třídy 4.

\Rightarrow Celý průřez je tedy třídy 4.

Tabulka 2.2

Část 2.3.1

Část 5.3.2

Tabulka 5.2

Tabulka 5.2

Tabulka 5.2

Stanovení průřezových charakteristik účinného průřezu

Výpočet redukčního součinitele ρ pro za studena tvarované přečnívající části:

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

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \text{kde } \bar{b} = c = 75 \text{ mm}$$

Za předpokladu konstantního napětí v tlačené pásnici platí:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 \quad \Rightarrow k_\sigma = 0,43$$

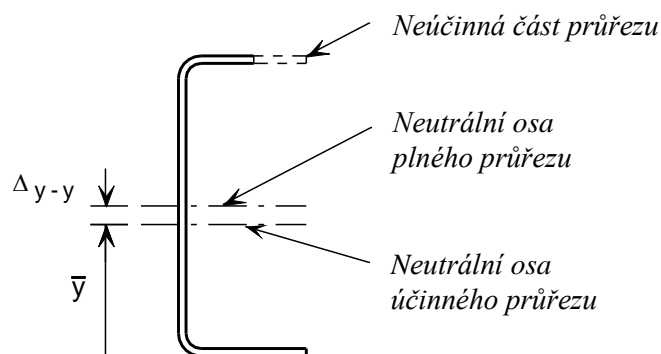
$$\bar{\lambda}_p = \frac{75/5}{28,4 \times 0,97 \times \sqrt{0,43}} = 0,830$$

$$\rho = \frac{1}{0,830} - \frac{0,188}{0,830^2} = 0,932$$

$$c_{\text{eff}} = \rho \times c = 0,932 \times 75 = 69,9$$

$$A_{\text{eff}} = A_g - (1 - \rho)ct = 1650 - (1 - 0,932) \times 75 \times 5 = 1625 \text{ mm}^2$$

Výpočet posunutí neutrální osy s uvažováním účinných částí průřezu:



$$\bar{y} = \frac{A_g \times \frac{h}{2} - (1 - \rho) \times c \times t \times \left(h - \frac{t}{2} \right)}{A_{\text{eff}}} = \frac{1650 \times \frac{200}{2} - (1 - 0,932) \times 75 \times 5 \times \left(200 - \frac{5}{2} \right)}{1625}$$

$$\bar{y} = 98,44$$

$$\text{Posunutí neutrální osy } \Delta_{y-y} = \frac{h}{2} - \bar{y} = \frac{200}{2} - 98,44 = 1,56 \text{ mm}$$

$$I_{\text{eff},y} = \left(I_y - \frac{(1 - \rho)ct^3}{12} - (1 - \rho)ct \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right)^2 - A_{\text{eff}} \Delta_{y-y}^2 \right)$$

$$I_{\text{eff},y} = 9,456 \times 10^6 - \frac{(1 - 0,932) \times 75 \times 5^3}{12} - (1 - 0,932) \times 75 \times 5 \times (100 - 2,5)^2 - 1625 \times 1,56^2$$

$$I_{\text{eff},y} = 9,21 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Část 5.4.1

Rov. 5.2

Rov. 5.3

Tabulka 5.4

Tabulka 5.4

$$W_{\text{eff},y} = \frac{I_{\text{eff},y}}{\frac{h}{2} + \Delta_{y-y}} = \frac{9,21 \times 10^6}{\frac{200}{2} + 1,56} = 90,69 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Smykové ochabnutí

Smykové ochabnutí lze při splnění podmínky $b_0 \leq L_e/50$ zanedbat.

$L_e = 4200 \text{ mm}$ (vzdálenost mezi místy s nulovým ohybovým momentem)

$L_e/50 = 84 \text{ mm}$, $b_0 = 75 \text{ mm}$, proto lze smykové ochabnutí ve výpočtu zanedbat.

Zvlnění pásnice

$$u = \frac{2 \sigma_a^2 b_s^4}{E^2 t^2 z}$$

$\sigma_a = 240 \text{ N/mm}^2$ (maximální možná hodnota)

$b_s = 75 - 5 = 70 \text{ mm}$

$z = 100 - 2,5 = 97,5 \text{ mm}$

$$u = \frac{2 \times 240^2 \times 70^4}{200000^2 \times 5^2 \times 97,5} = 0,028 \text{ mm}$$

Zvlnění pásnice lze při výpočtu zanedbat, pokud je splněno $u < 0,05 \times 200 = 10 \text{ mm}$

Zvlnění pásnice tedy lze v tomto případě zanedbat.

Dílčí součinitelé

V příkladu jsou použity následující dílčí součinitelé materiálu:

$\gamma_{M0} = 1,1$ a $\gamma_{M1} = 1,1$

Únosnost průřezu v ohybu

Pro průřez třídy 4 platí:

$$M_{c,Rd} = W_{\text{eff},\min} f_y / \gamma_{M0} = \frac{90,69 \times 10^3 \times 240}{1,1 \times 10^6} = 19,79 \text{ kNm}$$

$M_{Ed,\max} = 12,60 \text{ kNm} < M_{c,Rd} = 19,79 \text{ kNm}$

⇒ Únosnost průřezu v ohybu vyhovuje.

Únosnost průřezu ve smyku

$$V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}$$

$A_v = h \times t = 200 \times 5 = 1000 \text{ mm}^2$

$$V_{pl,Rd} = \frac{1000 \times 240}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 1000} = 125,97 \text{ kN}$$

$F_{Ed,\max} = 20,30 \text{ kNm} < V_{pl,Rd} = 125,97 \text{ kNm}$

⇒ Únosnost průřezu ve smyku vyhovuje.

Dále je třeba zkontrolovat, zda únosnost průřezu ve smyku není limitována boulením:

Za předpokladu, že $h_w = h - 2t = 200 - 2 \times 5 = 190 \text{ mm}$

$$\frac{h_w}{t} = \frac{190}{5} = 38, \text{ únosnost při boulení ve smyku je třeba zkontrolovat pokud } \frac{h_w}{t} \geq \frac{56,2 \varepsilon}{\eta}$$

$\eta = 1,20$

Část 5.4.2

Část 5.4.2

EN 1993-1-3

Část 5.4

Rov. 5.3a

Tabulka 4.1

Rov. 5.31

Rov. 5.32

Část 6.4.3

Rov. 6.20

$$\frac{h_w}{t} = 38 < \frac{56,2\varepsilon}{\eta} = \frac{56,2 \times 0,97}{1,20} = 45,4$$

⇒ Únosnost průřezu ve smyku není limitována boulením.

Únosnost prutu v ohybu s vlivem klopení

Tlačená pásnice mezi místy B a C není nijak podepřena proti klopení, proto je zapotřebí tuto část nosníku posoudit na ohyb s vlivem klopení:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{eff,y} f_y / \gamma_{MI} \text{ pro průřez třídy 4}$$

$$W_{eff,y} = 90,69 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

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

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

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

Stanovení pružného kritického momentu (M_{cr}):

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{1/2} - C_2 z_g$$

Bod C je prostě podepřený, zatímco bod B je plně držený proti klopení. Za předpokladu nejkonzervativnějšího případu (nejnižší hodnota pružného kritického momentu):

$$k = k_w = 1,00$$

C_1 a C_2 jsou určeny podle tvaru momentového obrazce a okrajových podmínek

$$\psi = 0 \Rightarrow C_1 = 1,77$$

$C_2 = 0$ (žádné příčné zatížení)

$$M_{cr} = 1,77 \times \frac{\pi^2 \times 200000 \times 0,850 \times 10^6}{(1,00 \times 2700)^2} \times \left(\left[\left(\frac{1,00}{1,00} \right)^2 \times \frac{5085 \times 10^6}{0,850 \times 10^6} + \frac{(1,00 \times 2700)^2 \times 76900 \times 1,372 \times 10^4}{\pi^2 \times 200000 \times 0,850 \times 10^6} \right]^{0,5} \right)$$

$$M_{cr} = 41,9 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{90,69 \times 10^3 \times 240}{41,9 \times 10^6}} = 0,721$$

Součinitel imperfekce při klopení $\alpha_{LT} = 0,34$ a pro za studena tvarované průřezy platí:

$$\phi_{LT} = 0,5 \times (1 + 0,34 \times (0,721 - 0,4) + 0,721^2) = 0,814$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,814 + [0,814^2 - 0,721^2]^{0,5}} = 0,839$$

$$M_{b,Rd} = 0,839 \times 90,69 \times 10^3 \times 240 \times 10^{-6} / 1,1$$

$$M_{b,Rd} = 16,60 \text{ kNm} < M_{Ed} = 12,0 \text{ kNm} \text{ (maximální moment v části nosníku bez držení)}$$

⇒ Únosnost prutu v ohybu s vlivem klopení vyhovuje.

Část 6.4.2

Rov. 6.13

Rov. 6.14

Rov. 6.15

Rov. 6.16

Příloha E

Rov. E.1

E.3

Tabulka E.1

Část 6.4.2

Průhyb

Kombinace zatížení pro mezní stav použitelnosti: $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

Jelikož v příkladu vystupuje pouze jedno proměnné zatížení ($Q_{k,1}$), poslední výraz může být dále vynechán.

Pro výpočet průhybu se používá sečnový modul pružnosti – je zapotřebí stanovit maximální napětí od stálého i proměnného zatížení.

$$\text{Sečnový modul pružnosti } E_S = \left(\frac{E_{S1} + E_{S2}}{2} \right)$$

Rov. 6.52

$$\text{kde } E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left(\frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad \text{a } i = 1,2$$

Rov. 6.53

Pro kombinaci zatížení při MSP jsou stanoveny příslušné vnitřní síly:

Maximální moment od vlastní tíhy nosníku = 1,90 kNm

Maximální moment od vlastní tíhy schodiště a užitečného zatížení = 6,68 kNm

Maximální moment od celkového zatížení = 8,58 kNm

Průřez je třídy 4, proto je pro výpočet maximálního napětí v prvku použit průřezový modul účinného průřezu W_{eff} .

Konzervativně lze předpokládat, že napětí v tlačené a tažené pásnici jsou téměř stejné, proto $E_{S1} = E_{S2}$.

Pro austenitickou korozivzdornou ocel 1.4401, $n = 7$.

$$\text{Návrhové napětí při MSP lze stanovit: } \sigma_{i,Ed,ser} = \frac{M_{max}}{W_{eff,y}} = \frac{8,58 \times 10^6}{90,69 \times 10^3} = 94,6 \text{ N/mm}^2$$

Tabulka 6.4

$$E_{S,i} = \frac{200000}{1 + 0,002 \times \frac{200000}{94,6} \times \left(\frac{94,6}{240} \right)^7} = 198757,6 \text{ N/mm}^2$$

Maximální průhyb od celkového zatížení je ve vzdálenosti přibližně 1,9 m od bodu A.

Velikost průhybu ve vzdálenosti x od bodu A od vlastní tíhy schodiště a užitečného zatížení působícího ve vzdálenosti a od bodu A lze stanovit podle následujícího výrazu:

$$\text{kde } x \geq a: \quad \delta = \frac{waL^4}{24aE_S I} n^2 \left[2m^3 - 6m^2 + m(4+n^2) - n^2 \right]$$

$$\text{kde } m = x/L \text{ a } n = a/L$$

$$\text{Když } x = 1,9 \text{ m a } a = 1,5 \text{ m: } m = 1,9/4,2 = 0,452; n = 1,5/4,2 = 0,357$$

Zatížení od vlastní tíhy schodiště + užitečné zatížení: $w = 11,0 \text{ kN/m}$

Zatížení od vlastní tíhy nosníku: $w = 0,128 \text{ kN/m}$

Průhyb od vlastní tíhy schodiště a užitečného zatížení ve vzdálenosti 1,9 m od bodu A, δ_1 :

$$\delta_1 = \frac{11000 \times 1,5 \times 4200^4}{24 \times 1500 \times 198757,6 \times 9,06 \times 10^6} \times 0,357^2 \times \left[2 \times 0,452^3 - 6 \times 0,452^2 + 0,452(4 + 0,357^2) - 0,357^2 \right]$$

$$\delta_1 = 7,04 \text{ mm}$$

Steel Designer's Manual (5. vydání)

Průhyb od vlastní tíhy nosníku, δ_2

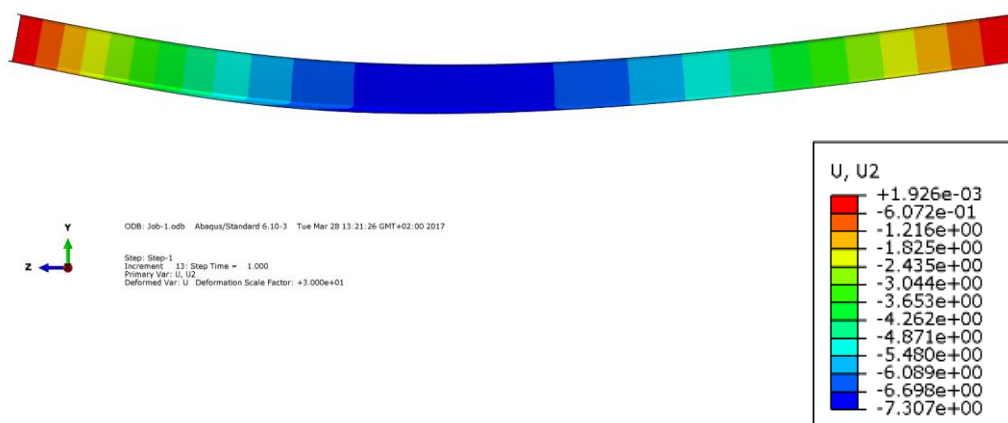
$$\delta_2 = \frac{5}{384} \times \frac{(w \times L)L^3}{E_s I} = \frac{5}{384} \times \frac{(0,128 \times 10^3 \times 4,2) \times 4200^3}{198757,6 \times 9,06 \times 10^6} = 0,29 \text{ mm}$$

Celkový průhyb $\approx \delta_1 + \delta_2 = 7,04 + 0,29 = 7,33 \text{ mm}$

$$\delta_{\text{limiting}} = \frac{L}{250} = \frac{4200}{250} = 16,8 \text{ mm} > 7,33 \text{ mm}$$

\Rightarrow Vypočtený průhyb je vyhovující.

(Průhyb byl stanoven i pomocí metody konečných prvků s využitím softwaru. Hodnota maximálního celkového průhybu je 7,307 mm, což je patrné z následujícího obrázku.)



Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)

PŘÍKLADOVÁ ČÁST

List 1 z 7

Název Příklad 10 – Excentricky zatížený sloup za požáru

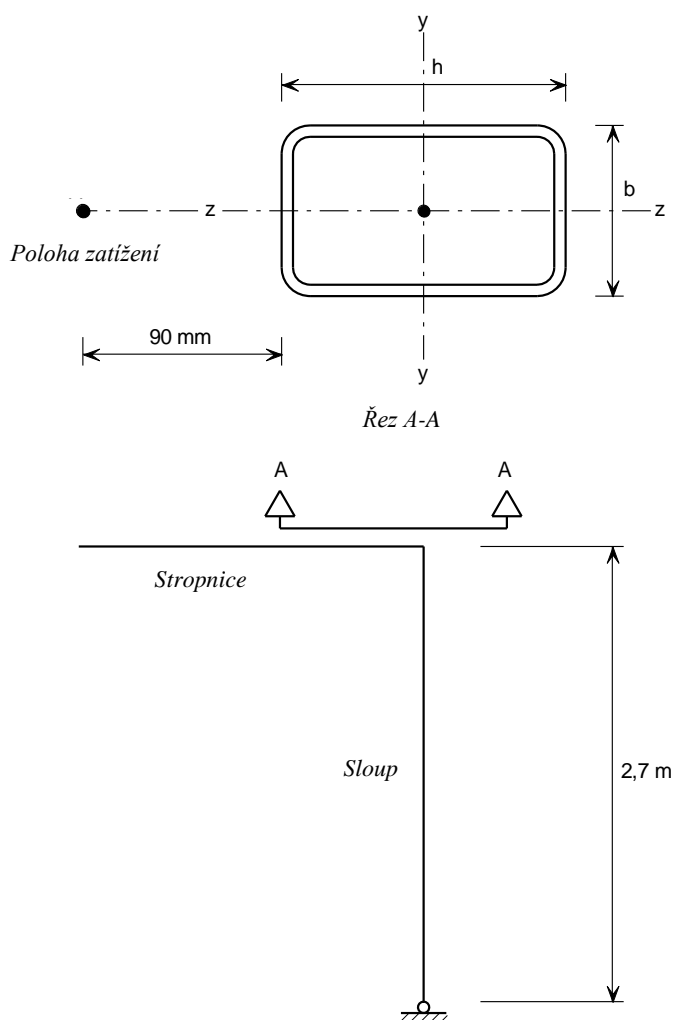
Klient Výzkumný fond pro uhlí a ocel

Vypracoval	SMH	Dat	08/01
Revidoval	MEB	Dat	04/06
Revidoval	SA	Dat	05/17

PŘÍKLAD 10 – EXCENTRICKY ZATÍŽENÝ SLOUP ZA POŽÁRU

Navrhněte za studena tvarovaný uzavřený obdélníkový průřez excentricky zatíženého sloupu s požadavkem na požární odolnost minimálně 30 minut.

Délka sloupu je 2,7 m a je zatížen reakcí ze stropnice na excentricitě 90 mm od hrany menšího rozměru průřezu, viz obrázek níže.



Zatížení

Výsledná excentricita zatížení je uvažována jako $90 \text{ mm} + h/2$, kde h je výška průřezu. Působící síla na této excentricitě tudíž vyvolá ohybový moment kolem hlavní osy sloupu.

- Charakteristické zatížení - stálé zatížení: 6 kN
- proměnné zatížení: 7 kN

Sloup bude nejprve posouzen v mezním stavu únosnosti za běžné teploty (LC1) a následně v mezním stavu únosnosti za požáru (LC2), s minimální požární odolností 30 minut:

$$\text{LC1 (MSÚ za běžné teploty)} \quad \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$$

$$\gamma_{G,j} = 1,35 \text{ (nepříznivý účinek)}$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,5$$

$$\text{LC2 (MSÚ za požáru)} \quad \sum_j \gamma_{GA,j} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1}$$

$$\gamma_{GA} = 1,0$$

Hodnoty $\psi_{1,1}$ jsou uvedeny v EN 1990 a Národní příloze EN 1990, v příkladu je ale konzervativně uvažována hodnota $\psi_{1,1} = 1,0$.

MSÚ za běžné teploty (LC1)

Zatížení sloupu od smykové síly na konci stropnice (LC1):

$$N_{Ed} = 1,35 \times 6 + 1,5 \times 7 = 18,6 \text{ kN}$$

Ohad profilu: HTR 100×50×6 za studena tvarovaný

Ohybový moment kolem hlavní osy (s uvážením excentrického působení síly):

$$M_{y,Ed} = 18,6 \times (0,09 + 0,10/2) = 2,60 \text{ kNm}$$

Dílčí součinitelé

V příkladu jsou tyto dílčí součinitelé (pro MSÚ za běžné teploty) rovny hodnotám:

$$\gamma_{M0} = 1,10 \text{ a } \gamma_{M1} = 1,10$$

Materiálové charakteristiky

Korozivzdorná austenitická ocel 1.4401.

$$f_y = 220 \text{ N/mm}^2 \text{ a } f_u = 530 \text{ N/mm}^2 \text{ (pro pás válcovaný za tepla).}$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2 \text{ and } G = 76900 \text{ N/mm}^2$$

Průřezové charakteristiky – HTR 100 x 50 x 6 mm

$$W_{el,y} = 32,58 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad i_y = 32,9 \text{ mm}$$

$$W_{pl,y} = 43,75 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad i_z = 19,1 \text{ mm}$$

$$A = 1500 \text{ mm}^2 \quad t = 6,0 \text{ mm}$$

Zatřídění průřezu

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = \left[\frac{235}{220} \times \frac{200000}{210000} \right]^{0,5} = 1,01$$

Pro HTR je šířka tláčené části průřezu c uvažována jako $h - 3t$

Pro stojinu tedy platí: $c = 100 - 3 \times 6 = 82 \text{ mm}$

Štíhlost stojiny: $c/t = 82/6 = 13,7$

Limit štíhlosti stojiny pro třídu průřezu 1 = $33\varepsilon = 33,33$

$33,33 > 13,7$ – stojina je třídy průřezu 1

Pokud je stojina třídy průřezu 1, pak pásnice bude taktéž splňovat limity štíhlosti třídy 1.

Celkově je tedy průřez třídy 1.

Tabulka 4.1

Tabulka 2.2
Část 2.3.1

Část 5.3.2

Tabulka 5.2

Tabulka 5.2

Tabulka 5.2

Tabulka 5.2

Únosnost průřezu v prostém tlaku

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \text{ pro průřezy třídy 1, 2, 3}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{1500 \times 220}{1,1} = 300 \text{ kN}$$

300 kN > 18,6 kN → Vyhovuje

Únosnost průřezu v ohybu

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \text{ pro průřezy třídy 1, 2, 3}$$

$$M_{c,y,Rd} = \frac{43750 \times 220}{1,1} = 8,75 \text{ kNm}$$

8,75 kNm > 2,60 kNm → Vyhovuje

Únosnost průřezu při interakci osově síly a ohybu

$$M_{y,Ed} \leq M_{N,Rd}$$

Pro HTR by měl být použit následující výpočet $M_{N,y,Rd}$:

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} (1 - n) / (1 - 0,5 a_w) \text{ ale } M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}$$

kde:

$$a_w = \frac{A - 2bt}{A} \text{ ale } a_w \leq 0,5$$

$$a_w = \frac{1500 - 2 \times 50 \times 6}{1500} = 0,6 \text{ ale } a_w \leq 0,5, \text{ proto } a_w = 0,5$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{18,6}{300} = 0,062$$

$$M_{N,y,Rd} = 8,75 \left(\frac{1 - 0,062}{1 - 0,5 \times 0,5} \right) = 10,94 \leq M_{pl,y,Rd} = 8,75$$

Proto $M_{N,y,Rd} = 8,75 \text{ kNm}$, tudíž $M_{y,Ed} \leq M_{N,Rd}$

Únosnost prutu při vzpěrném tlaku

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \text{ pro průřezy třídy 1, 2, 3}$$

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

kde:

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

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \text{ pro průřezy třídy 1, 2, 3}$$

L_{cr} = vzpěrná délka sloupu je konzervativně brána jako $1,0 \times$ délky sloupu = 2,7 m

Část 5.7.3

Rov. 5.27

Část 5.7.4

Rov. 5.29

Část 5.7.6

Rov. 5.33

EN 1993-1-1, Část 6.2.9.1(5)

Část 6.3.3

Rov. 6.2

Rov. 6.4

Rov. 6.5

Rov. 6.6

$$\bar{\lambda}_y = \frac{2700}{32,9} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{220}{200000}} = 0,866$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{2700}{19,1} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{220}{200000}} = 1,492$$

Křivka vzpěrné pevnosti: hlavní (y-y) osa průřezu:

Pro zastudena tvarovaný uzavřený průřez z korozivzdorné austenitické oceli vystavený vzpěrnému tlaku: $\alpha = 0,49$ a $\bar{\lambda}_0 = 0,30$.

$$\phi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,866 - 0,3) + 0,866^2) = 1,014$$

$$\chi_y = \frac{1}{1,014 + [1,014^2 - 0,866^2]^{0,5}} = 0,649$$

$$N_{b,y,Rd} = \frac{0,649 \times 1500 \times 220}{1,10} = 194,70 \text{ kN}$$

194,70 kN > 18,6 kN → Vyhovuje

Křivka vzpěrné pevnosti: vedlejší (z-z) osa průřezu:

$$\phi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (1,492 - 0,3) + 1,492^2) = 1,905$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,905 + [1,905^2 - 1,492^2]^{0,5}} = 0,324$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{0,324 \times 1500 \times 220}{1,10} = 97,20 \text{ kN}$$

97,20 kN > 18,6 kN → Vyhovuje

(Únosnost při vzpěru zkroucením nebude pro uzavřený obdélníkový průřez s poměrem stran $h/b = 2$ rozhodovat).

Únosnost prutu při interakci osově síly a ohybu

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{w,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1$$

$\beta_{w,y} = 1,0$ pro průřez třídy 1

$$k_y = 1,0 + D_1 (\bar{\lambda}_y - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \leq 1 + D_1 (D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$$

Z tabulky 6.6, $D_1 = 2,0$ a $D_2 = 0,3$ a $D_3 = 1,3$

$$k_y = 1,0 + 2 \times (0,866 - 0,3) \times \frac{18,6}{194,7} = 1,108 < 1 + 2 \times (1,3 - 0,3) \times \frac{18,6}{194,7} = 1,191$$

→ $k_y = 1,108$

$$\frac{18,6}{97,20} + 1,108 \times \left(\frac{2,60 \times 10^6 + 0}{1,0 \times 43,75 \times 10^3 \times 220 / 1,10} \right) = 0,521 < 1 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Tabulka 6.1

Část 6.3.1

Část 6.5.2

Rov. 6.56

Rov. 6.63

Tabulka 6.6

MSÚ za požáru (LC2)

Pro kombinaci zatížení LC2 jsou vypočteny následující vnitřní síly ve sloupu:

Osová tlaková síla $N_{fi,Ed} = 1,0 \times 6 + 1,0 \times 7 = 13,0$ kN

Maximální ohybový moment $M_{y,fi,Ed} = 13,0 \times (0,09 + 0,05) = 1,82$ kNm

Stanovení teploty oceli po 30 minutách požáru

Předpokládejme, že ocelový sloup není nijak chráněn proti požáru a rozložení teploty po průřezu je rovnoměrné. Zvýšení teploty během času Δt lze stanovit následovně:

$$\Delta\theta_t = \frac{A_m/V}{c \rho} \dot{h}_{net,d} \Delta t$$

Část 8.4.4

Rov. 8.41

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

Rov. 8.42

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta)$$

Rov. 8.43

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \varepsilon_{res} 5,67 \times 10^{-8} \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta + 273)^4 \right]$$

Rov. 8.44

kde:

θ_g = teplota plynu v těsném okolí sloupu za požáru je dána nominální teplotní křivkou následovně:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

Rov. 8.45

θ = povrchová teplota sloupu

Výchozí vstupní hodnoty pro stanovení konečné teploty oceli jsou následující:

$$A_m/V = 200 \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Část 8.4.4

Počáteční teplota oceli: $\theta = 20$ °C

Výsledná emisivita: $\varepsilon_{res} = 0,4$

Část 8.4.4

Hustota oceli: $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$ pro austenitickou ocel 1.4401

Tabulka 2.7

Polohový faktor: $\phi = 1,0$

EN 1991-1-2
Část 3.1(7)

Specifické (měrné) teplo je závislé na teplotě a lze stanovit následovně:

$$c = 450 + 0,28\theta - 2,91 \times 10^{-4}\theta^2 + 1,34 \times 10^{-7}\theta^3 \text{ J/kgK}$$

Rov. 8.37

$\Delta t = 2$ sekundy

Následně byl proveden postupný výpočet pro jednotlivé časové intervaly v programu Excel. Teplota oceli po 30 minutách požáru byla stanovena jako:

$$\theta = 829$$
 °C

Redukční součinitelé mechanických vlastností za zvýšené teploty

Do výpočtu únosnosti prvku za zvýšené teploty je nezbytné zavést následující redukční součinitele.

Část 8.2

Redukční součinitel modulu pružnosti: $k_{E,\theta} = E_\theta/E$

Rov. 8.4

Redukční součinitel smluvní meze kluzu: $k_{p0,2,\theta} = f_{p0,2,\theta}/f_y$

Rov. 8.1

Redukční součinitel pevnosti při 2% celkové deformace: $k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_y$ ale $f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$

Rov. 8.2

Hodnoty redukčních součinitelů pro teplotu 829 °C jsou stanoveny lineární interpolací:

$$k_{E,\theta} = 0,578$$

Tabulka 8.1

$$k_{p0,2,\theta} = 0,355$$

Tabulka 8.1

$$k_{2,0} = 0,430$$

$$k_{u,0} = 0,297$$

$$f_{2,0} = 0,430 \times 220 = 94,6 \text{ a } f_{u,0} = 0,297 \times 530 = 157, \text{ proto } f_{2,0} \leq f_{u,0}$$

Dílčí součinitel

$$\gamma_{M,fi} = 1,0$$

Zatřídění průřezu

Pro průřez namáhaný tlakem by redukční součinitel $k_{y,0}$ měl být založen na $f_{p0,2,0}$, tj. $k_{y,0} = k_{p0,2,0}$

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon \left[\frac{k_{E,0}}{k_{y,0}} \right]^{-0,5} = 1,01 \times \left[\frac{0,578}{0,355} \right]^{-0,5} = 1,29$$

$$\text{Stojina v tlaku: } c/t = 82/6 = 13,7$$

$$\text{Limitní štíhlost stojiny pro třídu 1} = 33 \varepsilon_{\theta} = 42,57$$

$$42,57 > 13,7 \rightarrow \text{stojina je třídy 1}$$

→ Celkově je průřez třídy 1 (pro tlak).

Únosnost prutu ve vzpěrném tlaku

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{p0,2,0} f_y}{\gamma_{M,fi}} \text{ pro průřez třídy 1,2 a 3}$$

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

kde:

$$\phi_{\theta} = 0,5 \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right)$$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{p0,2,0}}{k_{E,0}} \right]^{0,5} \text{ pro všechny třídy průřezu}$$

$$\bar{\lambda}_{y,0} = 0,866 \left[\frac{0,355}{0,578} \right]^{0,5} = 0,679$$

$$\bar{\lambda}_{z,0} = 1,492 \left[\frac{0,355}{0,578} \right]^{0,5} = 1,169$$

Křivka vzpěrnosti: hlavní osa (y-y):

Pro za studena tvarovaný uzavřený průřez z korozivzdorné austenitické oceli při vzpěrném tlaku platí, že $\alpha = 0,49$ a $\bar{\lambda}_0 = 0,30$

$$\phi_{\theta,y} = 0,5 \times \left(1 + 0,49 \times (0,679 - 0,3) + 0,679^2 \right) = 0,823$$

$$\chi_{fi,y} = \frac{1}{0,823 + [0,823^2 - 0,679^2]^{0,5}} = 0,776$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \frac{0,776 \times 0,355 \times 1500 \times 220}{1,0} = 90,91 \text{ kN}$$

Část 8.1

Část 8.3.2

Část 8.2

Rov. 8.6

Rov. 8.10

Rov. 8.12

Rov. 8.13

Rov. 8.14

Tabulka 6.1

90,91 kN > 13,0 kN → vyhovuje

Křivka vzpěrnosti: vedlejší osa (z-z):

$$\phi_{\theta,z} = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (1,169 - 0,3) + 1,169^2) = 1,396$$

$$\chi_{fi,z} = \frac{1}{1,396 + [1,396^2 - 1,169^2]^{0,5}} = 0,463$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \frac{0,463 \times 0,355 \times 1500 \times 220}{1,0} = 54,24 \text{ kN}$$

54,24 kN > 18,6 kN → vyhovuje

Únosnost prutu při ohybu v kombinaci s osovým tlakem

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{p0,2,0} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,0,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,0,Rd}} \leq 1$$

Rov. 8.26

kde:

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{p0,2,0} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3$$

Rov. 8.30

$$\mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3)\bar{\lambda}_{y,0} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8$$

Rov. 8.31

Za předpokladu kloubového uložení paty sloupu má průběh ohybového momentu trojúhelníkový tvar, proto $\beta_M = 1,8$:

Tabulka 8.3

$$\begin{aligned} \mu_y &= (1,2 \times 1,8 - 3) \times 0,679 + 0,44 \times 1,8 - 0,29 \\ &= -0,068 \end{aligned}$$

$$k_y = 1 - \frac{(-0,068) \times 13,0 \times 10^3}{0,776 \times 1500 \times 0,355 \times \frac{220}{1,0}} = 1,010 < 3,0$$

$$M_{y,fi,0,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} \left(\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right) \text{ pro průřezy třídy 1,2 a 3}$$

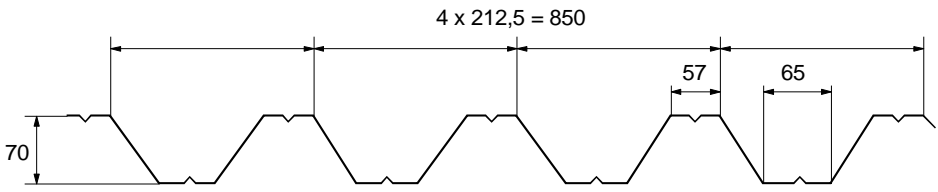
Rov. 8.15

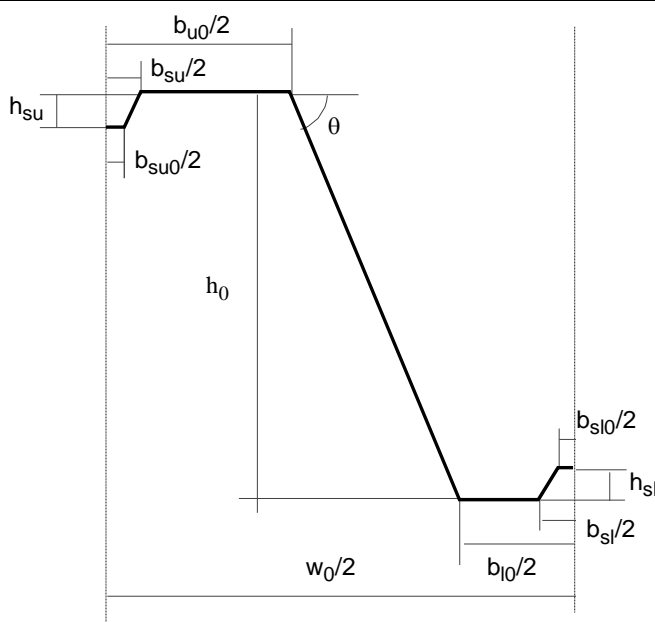
$$M_{y,fi,0,Rd} = 0,430 \times 8,75 \times \left(\frac{1,10}{1,0} \right) = 4,14 \text{ kNm}$$

$$\frac{13,0}{0,463 \times 1500 \times 0,355 \times \frac{220}{1,0}} + \frac{1,010 \times 1,82}{4,14} = 0,444 \leq 1$$

Rov. 8.26

Navržený průřez vyhoví za požáru minimálně 30 minut.

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST) PŘÍKLADOVÁ ČÁST			List 1 z 8
	Název	Příklad 11 – Návrh spojitého za studena zpracovaného trapézového plechu	
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	Vypracoval JG/AO
Revidoval GZ			Dat 03/06
Revidoval SJ			Dat 04/17
PŘÍKLAD 11 – NÁVRH SPOJITÉHO ZA STUDENA ZPRACOVANÉHO TR. PLECHU V příkladu je znázorněn postup návrhu trapézového plechu působícího jako spojitý nosník o dvou polích. Tr. plech je navržen ze za studena zpracované austenitické oceli 1.4401 CP500 s mezí kluzu $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$. Tloušťka plechu je 0,6 mm. Následně je provedeno porovnání s návrhem stejného trapézového plechu, kde byla použita feritická korozivzdorná ocel 1.4003 v žíhaném stavu s mezí kluzu $f_y = 280 \text{ N/mm}^2$ (viz. příklad 3). (V návrhovém postupu pro tr. plech z feritické či austenitické korozivzdorné oceli není rozdíl.) Rozměry průřezu jsou znázorněny na následujícím obrázku.			
			
Příklad obsahuje následující části výpočtu: <ul style="list-style-type: none"> - stanovení charakteristik účinného průřezu při MSÚ - stanovení únosnosti průřezu v ohybu - stanovení únosnosti trapézového plechu nad mezilehlou podporou - stanovení průhybu při MSP 			
Předpoklady návrhu			
Rozpon jednoho pole	L	=	3500 mm
Šířka podpor	s_s	=	100 mm
Char. zatížení	Q	=	1,4 kN/m ²
Vlastní tíha	G	=	0,07 kN/m ²
Tloušťka plechu	t	=	0,6 mm
Mez kluzu	f_y	=	460 N/mm ²
Modul pružnosti	E	=	200000 N/mm ²
Součinitel materiálu	γ_{M0}	=	1,1
Součinitel materiálu	γ_{M1}	=	1,1
Součinitel zatížení	γ_G	=	1,35
Součinitel zatížení	γ_Q	=	1,50
Označení a přesné velikosti částí průřezu jsou znázorněny na následujícím obrázku. Poloha trapézového plechu je zvolena tak, že při ohybu je horní pásnice nad mezilehlou podporou namáhána tlakem.			
			Tabulka 2.3 Část 2.3.1 Tabulka 4.1 Tabulka 4.1 Část 4.3 Část 4.3



Rozměry osy průřezu:

$h_0 = 70 \text{ mm}$
 $w_0 = 212,5 \text{ mm}$
 $b_{u0} = 65 \text{ mm}$
 $b_{l0} = 57 \text{ mm}$
 $b_{su} = 20 \text{ mm}$
 $b_{su0} = 8 \text{ mm}$
 $h_{su} = 6 \text{ mm}$
 $b_{sl} = 20 \text{ mm}$
 $b_{sl0} = 8 \text{ mm}$
 $h_{sl} = 6 \text{ mm}$
 $r = 2 \text{ mm}$ (vnitřní poloměr
zaoblení rohů)

Úhel stojiny:

$$\theta = \arctg \left| \frac{h_0}{0,5(w_0 - b_{u0} - b_{l0})} \right| = \arctg \left| \frac{70}{0,5 \times (212,5 - 65 - 57)} \right| = 57,1^\circ$$

Charakteristiky účinného průřezu při mezním stavu únosnosti (MSÚ)

Kontrola maximálního dovoleného poměru šířky k tloušťce:

$$h_0/t = 70/0,6 = 117 \leq 400 \sin \theta = 336$$

$$\max(b_{l0}/t; b_{u0}/t) = b_{u0}/t = 65/0,6 = 108 \leq 400$$

Kontrola náklonu stojiny a velikosti zaoblení rohů:

$$45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$$

$$b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22,5 \text{ mm}$$

Vliv zaoblení rohů na únosnost průřezu lze zanedbat při splnění následujících podmínek pro poloměr zaoblení $r \leq 5t$ a $r \leq 0,1b_p$

$$r = 2 \text{ mm} \leq \min(5t; 0,1b_p) = \min(5 \times 0,6; 0,1 \times 22,5) = 2,25 \text{ mm}$$

Vliv zaoblení rohů na únosnost průřezu lze zanedbat.

Poloha neutrálné osy v případě plně účinné stojiny průřezuStanovení redukčního součinitele ρ pro určení účinné šířky tlacené pásnice:

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

kde:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{22,5/0,6}{28,4 \times 0,698 \times \sqrt{4}} = 0,946$$

$$\bar{b} = b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22,5 \text{ mm}$$

$$\psi = 1 \Rightarrow k_\sigma = 4$$

Část 5.2

Tabulka 5.1

Tabulka 5.1

Část 5.6.2

Část 5.4.1
Rov. 5.1

Rov. 5.3

Tabulka 5.3

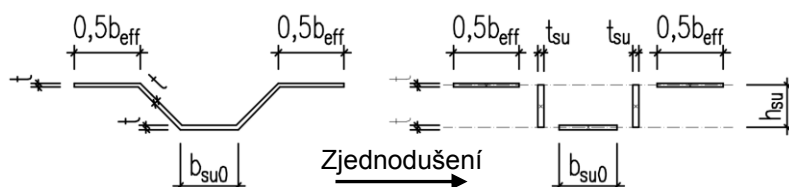
$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[\frac{235}{460} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,698$$

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,772}{0,946} - \frac{0,079}{0,946^2} = 0,728 \leq 1$$

$$b_{\text{eff},u} = \rho \bar{b} = 0,728 \times 22,5 = 16,38 \text{ mm}$$

Tabulka 5.2

Tabulka 5.3

Účinné rozměry výztuhy pásnice

$$t_{\text{su}} = \frac{\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su}0}}{2}\right)^2}}{h_{\text{su}}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$A_s = (b_{\text{eff},u} + b_{\text{su}0})t + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}} = (16,38 + 8) \times 0,6 + 2 \times 6 \times 0,849 = 24,82 \text{ mm}^2$$

Výraz 5.3

$$e_s = \frac{b_{\text{su}0}h_{\text{su}}t + 2h_{\text{su}}\frac{h_{\text{su}}}{2}t_{\text{su}}}{A_s} = \frac{8 \times 6 \times 0,6 + 2 \times 6 \times \frac{6}{2} \times 0,849}{24,82} = 2,39 \text{ mm}$$

$$I_s = 2(15t^2e_s^2) + b_{\text{su}0}t(h_{\text{su}} - e_s)^2 + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}}\left(\frac{h_{\text{su}}}{2} - e_s\right)^2 + 2\left(\frac{15t^4}{12}\right) + \frac{b_{\text{su}0}t^3}{12} + 2\frac{t_{\text{su}}h_{\text{su}}^3}{12}$$

$$I_s = 2 \times (15 \times 0,6^2 \times 2,39^2) + 8 \times 0,6 \times (6 - 2,39)^2 + 2 \times 6 \times 0,849 \times \left(\frac{6}{2} - 2,39\right)^2 + 2 \times \left(\frac{15 \times 0,6^4}{12}\right) + \frac{8 \times 0,6^3}{12} + 2 \times \frac{0,849 \times 6^3}{12} = 159,07 \text{ mm}^4$$

Výraz 5.3

$$b_s = 2\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su}0}}{2}\right)^2} + b_{\text{su}0} = 2 \times \sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2} + 8 = 25,0 \text{ mm}$$

$$l_b = 3,07 \left[I_s b_p^2 \left(\frac{2b_p + 3b_s}{t^3} \right) \right]^{1/4} = 3,07 \times \left[159,07 \times 22,5^2 \times \left(\frac{2 \times 22,5 + 3 \times 25}{0,6^3} \right) \right]^{1/4} = 251 \text{ mm}$$

Rov. 5.10

$$s_w = \sqrt{\left(\frac{w_0 - b_{u0} - b_{l0}}{2}\right)^2 + h_0^2} = \sqrt{\left(\frac{212,5 - 65 - 57}{2}\right)^2 + 70^2} = 83,4 \text{ mm}$$

Výraz 5.5

$$b_d = 2b_p + b_s = 2 \times 22,5 + 25 = 70 \text{ mm}$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} = \sqrt{\frac{83,4 + 2 \times 70}{83,4 + 0,5 \times 70}} = 1,37$$

Rov. 5.11

$$\frac{l_b}{s_w} = \frac{251}{83,4} = 3,01 \geq 2 \Rightarrow k_w = k_{w0} = 1,37$$

Rov. 5.8

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}}$$

Rov. 5.4

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \times 1,37 \times 200 \times 10^3}{24,82} \times \sqrt{\frac{159,07 \times 0,6^3}{4 \times 22,5^2 \times (2 \times 22,5 + 3 \times 25)}} = 551,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{460}{551,3}} = 0,913$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 0,913 < 1,38$$

Rov. 5.17

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \times 0,913 = 0,81$$

$$t_{red,u} = \chi_d t = 0,81 \times 0,6 = 0,486 \text{ mm}$$

Vzdálenost neutrální osy od osy tlačené pásnice:

$$t_{sl} = \frac{\sqrt{h_{sl}^2 + \left(\frac{b_{sl} - b_{sl0}}{2}\right)^2}}{h_{sl}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$t_w = t / \sin\theta = 0,6 / \sin(57,1^\circ) = 0,714 \text{ mm}$$

e_i [mm]	A_i [mm ²]
0	$0,5b_{eff,u} t = 4,9$
0	$0,5b_{eff,u} \chi_d t = 3,98$
$0,5h_{su} = 3$	$h_{su} \chi_d t_{su} = 4,13$
$h_{su} = 6$	$0,5b_{su0} \chi_d t = 1,94$
$0,5h_0 = 35$	$h_0 t_w = 49,98$
$h_0 = 70$	$0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$
$h_0 - 0,5h_{sl} = 67$	$h_{sl} t_{sl} = 5,09$
$h_0 - h_{sl} = 64$	$0,5b_{sl0} t = 2,4$

$$A_{tot} = \sum A_i = 83,52 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_i e_i}{A_{tot}} = 36,46 \text{ mm}$$

Účinné rozměry tlačené stojiny průřezu

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} = 0,76t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \sigma_{com,Ed}}} = 0,76 \times 0,6 \times \sqrt{\frac{200}{1,1 \times 460 \times 10^{-3}}}$$

$$= 9,07 \text{ mm}$$

$$s_{eff,n} = 1,5s_{eff,0} = 1,5 \times 9,07 = 13,61 \text{ mm}$$

EN 1993-1-3
5.5.3.4.3(4-5)

Charakteristiky účinného průřezu půlplny trapézového plechu

$$h_{\text{eff},1} = s_{\text{eff},1} \sin \theta = 9,07 \times \sin(57,1^\circ) = 7,62 \text{ mm}$$

$$h_{\text{eff},n} = s_{\text{eff},n} \sin \theta = 13,61 \times \sin(57,1^\circ) = 11,43 \text{ mm}$$

$e_{\text{eff},i} [\text{mm}]$	$A_{\text{eff},i} [\text{mm}^2]$	$I_{\text{eff},i} [\text{mm}^4]$
0	$0,5b_{\text{eff},u}t = 4,9$	≈ 0
0	$0,5b_{\text{eff},u} \chi_d t = 4,0$	≈ 0
$0,5h_{\text{su}} = 3$	$h_{\text{su}} \chi_d t_{\text{su}} = 4,1$	$\chi_d t_{\text{su}} h_{\text{su}}^3 / 12 = 12,4$
$h_{\text{su}} = 6$	$0,5b_{\text{su}0} \chi_d t = 1,9$	≈ 0
$0,5h_{\text{eff},1} = 3,8$	$h_{\text{eff},1} t_w = 5,4$	$t_w h_{\text{eff},1}^3 / 12 = 26,3$
$h_0 - 0,5(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) = 47,5$	$(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) t_w = 32,1$	$t_w \frac{(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n})^3}{12} = 5411,1$
$h_0 = 70$	$0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$	≈ 0
$h_0 - 0,5h_{\text{sl}} = 67$	$h_{\text{sl}} t_{\text{sl}} = 5,1$	$t_{\text{sl}} h_{\text{sl}}^3 / 12 = 15,3$
$h_0 - h_{\text{sl}} = 64$	$0,5b_{\text{sl}0} t = 2,4$	≈ 0

$$A_{\text{tot}} = \sum A_{\text{eff},i} = 71,0 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_{\text{eff},i} e_{\text{eff},i}}{A_{\text{tot}}} = 40,0 \text{ mm}$$

$$I_{\text{tot}} = \sum I_{\text{eff},i} + \sum A_{\text{eff},i} (e_c - e_{\text{eff},i})^2 = 5\,465,1 + 46\,021,6 = 51\,486,7 \text{ mm}^2$$

Ideálně lze přesnější průřezové charakteristiky stanovit iteračním výpočtem, kde při jednotlivých krocích dochází k posunům těžiště účinného průřezu.

EN 1993-1-3

Únosnost průřezu v ohybu na jednotku šířky (1 m)

$$I = \frac{1000}{0,5w_0} I_{\text{tot}} = \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 51\,486,7 = 484\,580,7 \text{ mm}^4$$

$$W_u = \frac{I}{e_c} = \frac{484\,580,7}{40} = 12\,114,5 \text{ mm}^3$$

$$W_l = \frac{I}{h_0 - e_c} = \frac{484\,580,7}{70 - 40} = 16\,152,7 \text{ mm}^3$$

$$\text{Protože } W_u < W_l \Rightarrow W_{\text{eff},\text{min}} = W_u = 12\,114,5 \text{ mm}^3$$

$$M_{c,\text{Rd}} = \frac{W_{\text{eff},\text{min}} f_y}{\gamma_{\text{M}0}} = 12114,5 \times 460 \times \frac{10^{-6}}{1,1} = 5,07 \text{ kNm}$$

Rov. 5.31

Stanovení únosnosti plechu nad mezilehlou podporou

Část 6.4.4

Borcení stojiny

$$c \geq 40 \text{ mm}$$

EN 1993-1-3

$$r/t = 2/0,6 = 3,33 \leq 10$$

Část 6.1.7

$$h_w/t = 70/0,6 = 117 \leq 200 \sin \theta = 200 \sin(57,1^\circ) = 168$$

$$45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$$

$$\beta_V = 0 \leq 0,2 \Rightarrow l_a = s_s = 100 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,15 \text{ (kategorie 2)}$$

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_y E} \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{r}{t}}\right) \left(0,5 + \sqrt{0,02 \frac{l_a}{t}}\right) \left[2,4 + \left(\frac{\varphi}{90}\right)^2\right] \frac{1}{\gamma_{M1}} \frac{1000}{0,5 w_0}$$

$$R_{w,Rd} = 0,15 \times 0,6^2 \sqrt{460 \times 200\,000} \times \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{2}{0,6}}\right) \left(0,5 + \sqrt{0,02 \times \frac{100}{0,6}}\right) \times \left[2,4 + \left(\frac{57,1}{90}\right)^2\right] \times \frac{1}{1,1} \times \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 10^{-3} = 23,6 \text{ kN}$$

EN 1993-1-3
Rov. 6.18

Kombinace ohybového momentu a podporové reakce

Návrhové zatížení na jednotku šířky (1 m):

$$q = \gamma_G G + \gamma_Q Q = 1,35 \times 0,07 + 1,5 \times 1,4 = 2,19 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = \frac{qL^2}{8} = \frac{2,19 \times 3,5^2}{8} = 3,35 \text{ kNm}$$

$$F_{Ed} = \frac{5}{4} qL = \frac{5}{4} \times 2,19 \times 3,5 = 9,58 \text{ kN}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{3,35}{5,07} = 0,661 \leq 1,0$$

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = \frac{9,58}{23,6} = 0,406 \leq 1,0$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = 0,661 + 0,406 = 1,067 \leq 1,25$$

Navržený průřez vyhovuje.

EN 1993-1-3
Rov.6.28a - c

Stanovení průhybu při mezním stavu použitelnosti (MSP)

Charakteristiky účinného průřezu

Pro stanovení průhybu při MSP by měly být efektní průřezové charakteristiky stanoveny pro napětí způsobené odpovídající kombinací zatížení (kombinace pro MSP).

Konzervativně je hodnota maximálního tlakového napětí vypočtena pomocí účinného průřezového modulu W_u , který byl stanoven v předchozím výpočtu pro MSÚ.

$$M_{y,Ed,ser} = \frac{(G + Q)L^2}{8} = \frac{(0,07 + 1,4) \times 3,5^2}{8} = 2,25 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{com,Ed,ser} = \frac{M_{y,Ed,ser}}{W_u} = \frac{2,25 \times 10^6}{12114,5} = 185,7 \text{ N/mm}^2$$

Charakteristiky účinného průřezu jsou stanoveny stejným způsobem jako v předchozích výpočtech, pouze je hodnota meze kluzu f_y nahrazena hodnotou napětí $\sigma_{com,Ed,ser}$ a tloušťka výztuhy pásnice není nijak redukována. Výsledky výpočtu jsou následující:

Účinná šířka tlačené pásnice:

Pásnice je plně účinná

Poloha neutrálné osy za předpokladu plně účinné stojiny: $e_c = 34,1 \text{ mm}$

Účinná výška tlačené části stojiny:

Stojina není plně účinná

EN 1993-1-3
Část 5.5.1

Účinná část tlačené stojiny:

$$s_{\text{eff},1} = 14,268 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},n} = 21,4 \text{ mm}$$

Charakteristiky účinného průřezu pro půlvlnu:

$$A_{\text{tot}} = 82,44 \text{ mm}^2$$

$$e_c = 36,25 \text{ mm}$$

$$I_{\text{tot}} = 59726,1 \text{ mm}^4$$

Charakteristiky účinného průřezu na jednotku šířky (1m):

$$I = 562128,0 \text{ mm}^4$$

$$W_u = 15507,0 \text{ mm}^4$$

$$W_l = 16655,6 \text{ mm}^4$$

Stanovení průhybu

Sečnový modul pružnosti odpovídající maximální hodnotě ohybového momentu:

$$\sigma_{1,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_u} = \frac{2,25 \times 10^6}{15\,507} = 145,096 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_l} = \frac{2,25 \times 10^6}{16\,655,6} = 135,090 \text{ N/mm}^2$$

$n = 7$ (pro austenitickou korozivzdornou ocel 1.4401)

$$E_{S,1} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}} \left(\frac{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,145} \left(\frac{0,145}{0,460} \right)^7} = 199,83 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_{S,2} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}} \left(\frac{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,135} \left(\frac{0,135}{0,460} \right)^7} = 199,89 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_S = \frac{E_{S,1} + E_{S,2}}{2} = \frac{199,83 + 199,89}{2} = 199,86 \text{ kN/mm}^2$$

Pro daný typ korozivzdorné oceli a velikost napětí se vliv nelinearity materiálu na velikosti modulu pružnosti neprojeví.

Kontrola průhybu:

Pro stanovení tuhosti průřezu je třeba zohlednit vliv zaoblení rohů. Tento vliv je ve výpočtu zohledněn následovně:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} = 0,43 \frac{2 \times \frac{294,2^\circ}{90^\circ}}{149,3} = 0,019$$

$$I_{y,r} = I (1 - 2\delta) = 562128,0 (1 - 2 \times 0,019) = 540767,1 \text{ mm}^4$$

Pro místo maximálního průhybu platí:

$$x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times L = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times 3,5 = 1,48 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{(G + Q)L^4}{48E_S I_{y,r}} \left(\frac{x}{L} - 3 \frac{x^3}{L^3} + 2 \frac{x^4}{L^4} \right)$$

$$\delta = \frac{(0,07 + 1,4) \times 10^3 \times 3,5^4}{48 \times 199,86 \times 10^6 \times 540767,1 \times 10^{-12}} \times \left(\frac{1,48}{3,5} - 3 \times \frac{1,48^3}{3,5^3} + 2 \times \frac{1,48^4}{3,5^4} \right)$$

$$\delta = 11,1 \text{ mm}$$

Tabulka 6.4

Rov. 6.53

Rov. 6.53

Rov. 6.52

Rov. 5.22

Rov. 5.20

Dovolená hodnota průhybu $L/200 = 3500/200 = 17,5 \text{ mm} > 11,1 \text{ mm}$, tudíž vypočtená hodnota průhybu je přijatelná.

Porovnání mezi plechy v žíhaném stavu a plechy za studena zpracované

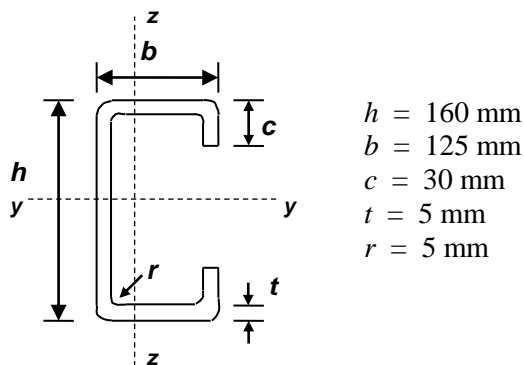
Porovnání únosnosti průřezu v ohybu a únosnosti prvku na příčné síly nad podporou pro trapézové plechy se stejnou geometrií průřezu z materiálu v žíhaném stavu ($f_y = 280 \text{ N/mm}^2$) a z materiálu za studena zpracovaného ($f_y = 460 \text{ N/mm}^2$) je provedeno zde:

$$f_y = 280 \text{ N/mm}^2 \text{ (Příklad 3)} \quad M_{c,Rd} = 3,84 \text{ kNm} \text{ a } R_{w,Rd} = 18,4 \text{ kN}$$

$$f_y = 460 \text{ N/mm}^2 \text{ (Příklad 11)} \quad M_{c,Rd} = 5,07 \text{ kNm} \text{ a } R_{w,Rd} = 23,6 \text{ kN}$$

U plechů z materiálu v žíhaném stavu musí být rozpon redukován na 2,9 m na rozdíl od 3,5 m u za studena zpracovaných plechů. Tudíž za studena tvarovaný trapézový plech umožňuje zvětšení rozponu, což v případě střešní konstrukce vede ke snížení počtu vaznic a tím i ke snížení nákladů.

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST) PŘÍKLADOVÁ ČÁST	List 1 z 7			
	Název	Příklad 12 – Návrh nosníku na ohyb s vlivem klopení		
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	Vypracoval ER/EM	Dat 02/06
			Revidoval HB	Dat 03/06
		Revidoval ER/IA	Dat 04/17	
PŘÍKLAD 12 – NÁVRH NOSNÍKU NA OHYB S VLIVEM KLOPENÍ <p>Navrhněte průřez nosníku tvaru C s vyztuženými pásnicemi z korozivzdorné austenitické oceli 1.4401, za studena tvarované (CP500), na ohyb. Jedná se o prostý nosník o rozpětí $l = 4,0$ m. Osová vzdálenost ostatních nosníků je $1,0$ m.</p> <p>Vzhledem k tomu, že výslednice zatížení neprochází středem smyku průřezu, je nezbytné ověřit únosnost nosníku při interakci kroucení a ohybu s vlivem klopení. V tomto příkladu je ověřena pouze únosnost nosníku při ohybu s vlivem klopení.</p> <p>Dílčí součinitele Pro materiál - $\gamma_{M0} = 1,1$ a $\gamma_{M1} = 1,1$ Pro zatížení - $\gamma_G = 1,35$ (stálé zatížení) a $\gamma_Q = 1,5$ (proměnné zatížení)</p> <p>Zatížení Stálé zatížení (G): 2 kN/m^2 Proměnné zatížení (Q): 3 kN/m^2 Hodnota liniového zatížení pro zatěžovací šířku 1 m: $G_k = 2 \text{ kN/m}$ $Q_k = 3 \text{ kN/m}$ Zatěžovací stav pro mezní stav únosnosti: $q^* = \sum_j \gamma_{Gj} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 7,2 \text{ kN/m}$</p> <p>Vnitřní síly Maximální smyková síla – v místě podpory $V_{Ed} = \frac{q^* \times 4}{2} = 14,4 \text{ kN}$ Maximální ohybový moment – uprostřed rozpětí $M_{Ed} = \frac{q^* \times 4^2}{8} = 14,4 \text{ kNm}$</p> <p>Materiálové charakteristiky $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ $E = 200000 \text{ N/mm}^2$ a $G = 76900 \text{ N/mm}^2$</p> <p>Průřezové charakteristiky Vliv zaoblení v rozích průřezu na únosnost průřezu se může zanedbat, je-li vnitřní poloměr $r \leq 5t$ a zároveň $r \leq 0,10b_p$. Při splnění těchto podmínek lze průřez považovat za ostrohanný, složený z rovinných prvků. Pro výpočet tuhosti průřezu nelze toto zjednodušení použít.</p>				
			Tabulka 4.1 EN 1991	
			EN 1991	
			Tabulka 2.3 Část 2.3.1	
			Část 5.6.2	



$$\begin{aligned} h &= 160 \text{ mm} \\ b &= 125 \text{ mm} \\ c &= 30 \text{ mm} \\ t &= 5 \text{ mm} \\ r &= 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$r_m = r + t/2 = 7,5 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m [\tan(\varphi/2) - \sin(\varphi/2)] = 2,2 \text{ mm}$$

$$b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 5t = 25 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 0,10b_p = 11,56 \text{ mm}$$

Vliv zaoblení rohů na vlastnosti jednotlivých částí průřezu může být s dostatečnou přesností zohledněn zmenšením rozměrů vypočítaných na ostrohranném průřezu následovně:

Šířka pásnice: $b_{p,f} = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$

Výška stojiny: $b_{p,w} = h - t - 2g_r = 150,6 \text{ mm}$

Šířka výztuhy pásnice: $b_{p,l} = c - t/2 - g_r = 25,3 \text{ mm}$

$$A_{g,sh} = t [2b_{p,f} + b_{p,w} + 2b_{p,l}] = 2162 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} I_{yg,sh} &= 2 \times \left[\frac{1}{12} b_{p,f} t^3 + b_{p,f} t (0,5h - 0,5t)^2 \right] + 2 \times \left[\frac{1}{12} b_{p,l}^3 t + b_{p,l} t (0,5h - (c - b_{p,l}) - 0,5b_{p,l})^2 \right] + \\ &+ \frac{1}{12} b_{p,w}^3 t = 9,376 \times 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$$

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) = 2119 \text{ mm}^2$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) = 9,0 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Zatřídění průřezu

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = 0,698$$

Pásnice: vnitřní část namáhaná tlakem

$$c = b_{p,f} = 115,6 \text{ mm} \text{ a } c/t = 23,12$$

Pro třídu 2, $c/t \leq 35\varepsilon = 24,43$, proto je pásnice třídy 2

Stojina: vnitřní část namáhaná ohybem

$$c = b_{p,w} = 150,6 \text{ mm} \text{ a } c/t = 30,12$$

Pro třídu 1, $c/t \leq 72\varepsilon = 50,26$, proto je stojina třídy 1

Figure 5.5

Rov. 5.22

Rov. 5.19

Rov. 5.20

Část 5.3

Tabulka 5.2

Výztuha pásnice: přečnívající část namáhaná tlakem

$$c = b_{p,l} = 25,30 \text{ mm a } c/t = 5,06$$

Pro třídu 1, $c/t \leq 9\varepsilon = 6,28$, proto je výztuha pásnice třídy 1. Celkově je průřez třídy 2.

Účinky smykového ochabnutí

Smykové ochabnutí v pásnicích lze zanedbat pokud $b_0 < L_e/50$, kde b_0 je přečnívající část pásnice nebo polovina šířky vnitřní části a L_e je délka mezi body s nulovým momentem.

$$\text{Polovina šířky vnitřní části: } b_0 = (b - t)/2 = 60 \text{ mm}$$

$$\text{Délka mezi body s nulovým momentem je: } L_e = 4000 \text{ mm, } L_e/50 = 80 \text{ mm}$$

Smykové ochabnutí v pásnicích lze zanedbat.

Zvlnění pásnice

Zvlnění pásnice směrem k neutrální ose na únosnost průřezu namáhaného ohybem lze zanedbat, pokud je menší než 5 % výšky průřezu:

$$u = 2 \frac{\sigma_a^2 b_s^4}{E^2 t^2 z}$$

σ_a je průměrné napětí v pásnicích vypočítané z celkové plochy průřezu (předpokládá se $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$)

$$b_s = \text{převis pásnice přes stojinu} = b_{p,f} + b_{p,l} = 140,9 \text{ mm}$$

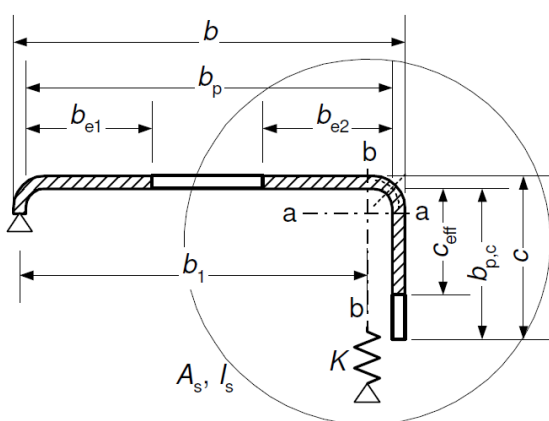
$$t = 5 \text{ mm}$$

$$z = \text{vzdálenost uvažované pásnice od neutrální osy} = 77,5 \text{ mm}$$

$$u = 2,15 \text{ mm} < 0,05h = 8 \text{ mm, proto lze zvlnění pásnice zanedbat}$$

Průřezy s výztuhou. Okrajové výztuhy

Distorzní boulení. Rovinné části s okrajovými výztuhami



$$b/t \leq 60$$

a) jednoduchá okrajová výztuha

Krok 1: Počáteční účinný průřez výztuhy

Pro pásnice (již vypočteno)

$$b = 125 \text{ mm a } b_p = b_{p,f} = 115,6 \text{ mm}$$

Část 5.4.2

Část 5.4.3

EN 1993-1-3,
Část 5.4
Rov. 5.3a

Část 5.5.1 a
EN 1993-1-3,
Část 5.5.3

EN 1993-1-3,
Část 5.5.3.2

Příklad 12	List 4 z 7
<p>Pro jednoduchou okrajovou výztuhu se hodnoty účinných šířek určí podle následujících vztahů:</p> $b_{p,c} = b_{p,l} = 25,30 \text{ mm}$ $b_{p,c}/b_p = 0,22 < 0,35 \quad \text{pak} \quad k_\sigma = 0,5$ $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,36 \quad (\bar{b} = 25,3 \text{ mm})$ <p>Za studena tvarovaný průřez – přečnívající část: $\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = 1,33 > 1$, proto $\rho = 1,0$</p> $c_{\text{eff}} = \rho b_{p,c} = 25,30 \text{ mm}$ <p>Krok 2: Součinitel vzpěrnosti pro distorzní ztrátu stability (rovinné vybočení výztuhy) Následuje výpočet průřezových charakteristik s uvážením účinné části výztuhy pásnice:</p> $b_{e2} = b_{p,f} = 115,6 \text{ mm}$ <p>V daném příkladu je tlačena pásnice třídy 2, tudíž se nijak neredukuje. Délka b_{e2} již zahrnuje celou šířku pásnice bez redukce ($b_{e1} = 0$).</p> $c_{\text{eff}} = b_{p,l} = 25,30 \text{ mm}$ $A_s = (b_{e2} + c_{\text{eff}})t = (b_{b,f} + b_{b,l}) \times t = 704,5 \text{ mm}^2$ <p>Pérová tuhost K_1 lze stanovit podle následujícího vzorce:</p> $K_1 = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5b_1 b_2 h_w k_f} \right) = 6,4 \text{ N/mm}^2$ <p>$b_1 = b - y_b - t/2 - r = 71,1 \text{ mm}$ (vzdálenost mezi průsečíkem stojiny s pásnicí a těžištěm účinné plochy okrajové výztuhy včetně účinné šířky pásnice b_{e2}).</p> <p>$k_f = 0$ (druhá pásnice je tahu)</p> $h_w = h - 2t - 2r = 160 - 2 \times 5 - 2 \times 5 = 140 \text{ mm}$ <p>Pružné kritické napětí okrajové výztuhy pro účinnou část výztuhy pro $K = K_1$:</p> $\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} = 565,8 \text{ N/mm}^2$ <p>Součinitel vzpěrnosti χ_d pro únosnost v distorzním vybočení se má stanovit následovně:</p> $\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}} = 0,90$ $0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad \text{pak} \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 0,82$ <p>Redukovaná účinná plocha výztuhy pro výpočet únosnosti při rovinném vybočení pro napětí $\sigma_{\text{com,Ed}} = f_{yb}/\gamma_{M0}$ je:</p> $A_{s,\text{red}} = \chi_d A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{\text{com,Ed}}} = 576,4 \text{ mm}^2$ $t_{\text{red}} = t A_{s,\text{red}}/A_s = 4,1 \text{ mm}$ <p>Výpočet účinných průřezových charakteristik s uvážením distorzního vybočení výztuhy:</p> $A_{g,\text{sh}} = t [b_{p,f} + b_{p,w} + b_{p,l}] + t_{\text{red}} [b_{p,f} + b_{p,l}] = 2034,0 \text{ mm}^2$ $\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$	<p>EN 1993-1-3, Rov. 5.13b</p> <p>Rov. 5.3</p> <p>Rov. 5.2</p> <p>EN 1993-1-3, Rov. 5.13a</p> <p>EN 1993-1-3, Rov. 5.10b</p> <p>EN 1993-1-3, Rov. 5.15</p> <p>EN 1993-1-3, Rov. 5.12d</p> <p>EN 1993-1-3, Rov. 5.12b</p> <p>EN 1993-1-3, Rov. 5.17</p> <p>Rov. 5.22</p>

Příklad 12	List 5 z 7
<p>$A_g = A_{g,sh} (1-\delta) = 1993,3 \text{ mm}^2$</p> <p>Posun těžiště e_{eff} od těžiště stojiny (kladný posun – směr dolů):</p> $e_{eff} = \frac{-b_{p,f} t_{red} (0,5h - 0,5t_{red}) + b_{p,f} t (0,5h - 0,5t) - b_{p,l} t_{red} (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l})}{A_{g,sh}} + \frac{b_{p,l} t (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l}) + b_{p,l} 0}{A_{g,sh}} = 4,7 \text{ mm}$ <p>$I_{y,g,sh} =$</p> $\frac{1}{12} b_{p,f} t_{red}^3 + b_{p,f} t_{red} (0,5h - 0,5t_{red} + e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,l}^3 t_{red} + b_{p,l} t_{red} (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l} + e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,f} t^3 + b_{p,f} t (0,5h - 0,5t - e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,l}^3 t + b_{p,l} t (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l} - e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,w}^3 t + b_{p,w} t (e_{eff})^2 = 8,64 \times 10^6 \text{ mm}^4$	Rov. 5.19
<p>$I_{y,g} = I_{y,g,sh} (1-2\delta) = 8,297 \times 10^6 \text{ mm}^4$</p> <p>$z_{max} = h/2 + e_{eff} = 160/2 + 4,7 = 84,7 \text{ mm}$ (vzdálenost horních vláken od neutrálné osy)</p> <p>$W_{y,g} = I_{y,g} / z_{max} = 97,95 \times 10^3 \text{ mm}^3$</p>	Rov. 5.20
<p>Únosnost průřezu</p> <p>Únosnost průřezu při ohybu</p> <p>$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} = 41,0 \text{ kNm}$</p> <p>Maximální ohybový moment od zatížení je $M_{Ed} = 14,4 \text{ kNm}$, tudíž průřez vyhoví.</p>	Část 5.7 Část 5.7.4 Rov. 5.29
<p>Únosnost průřezu ve smyku</p> <p>$A_v = 800 \text{ mm}^2$</p> <p>$V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 193,15 \text{ kN}$</p> <p>Maximální smyková síla od zatížení je $V_{Ed} = 14,4 \text{ kN}$, tudíž průřez vyhoví.</p>	Část 5.7.5 Rov. 5.32
<p>Únosnost průřezu v ohybu v kombinaci se smykem</p> <p>$V_{Ed} = 14,4 \text{ kN} > 0,5 V_{pl,Rd} = 96,57 \text{ kN}$</p> <p>Jedná se o “malý smyk”, proto lze posouzení na únosnost průřezu v ohybu v kombinaci se smykem zanedbat.</p>	Část 5.7.6
<p>Únosnost prutu</p> <p>Únosnost prutu v ohybu s vlivem klopení</p> <p>$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}$</p> $\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1$ <p>$\phi_{LT} = 0,5 (1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4)) + \bar{\lambda}_{LT}^2$</p> <p>$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$</p>	Část 6.4 Část 6.4.2 Rov. 6.13 Rov. 6.14 Rov. 6.15 Rov. 6.16

$\alpha_{LT} = 0,34$ pro za studena tvarované průřezy

Stanovení pružného kritického momentu:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left(\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right)$$

Rov. E.1

Pro prostě podepřený rovnoměrně zatížený nosník: $C_1 = 1,13$ a $C_2 = 0,454$

Tabulka E.2

Za předpokladu kloubového uložení (z hlediska kroucení) obou konců: $k = k_w = 1$

z_a je souřadnice působíště zatížení vzhledem k těžišti průřezu

z_s je souřadnice středu smyku vzhledem k těžišti průřezu

$$z_g = z_a - z_s = h/2 = 80 \text{ mm}$$

y_G = vzdálenost střednice stojiny od těžiště průřezu

$$y_G = \frac{2b_{p,f}t(g_r + 0,5b_{p,f}) + 2b_{p,l}t(b - 0,5t)}{A_s} = 46,4 \text{ mm}$$

$$I_{z,sh} = 4,590 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{t,sh} = 18,02 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$I_{w,sh} = 23,19 \times 10^9 \text{ mm}^6$$

$$I_z = I_{z,sh} (1 - 2\delta) = 4,406 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_t = I_{t,sh} (1 - 2\delta) = 17,30 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) = 21,33 \times 10^9 \text{ mm}^6$$

$$\text{Pak } M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left(\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - (C_2 z_g) \right) = 34,76 \text{ kNm}$$

Rov. E.1

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,g} f_y}{M_{cr}}} = 1,14 \quad (W_{y,g} = 97,95 \times 10^3 \text{ mm}^3, \text{ tlačena pásnice})$$

Rov. 6.16

$$\phi_{LT} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 1,27$$

Rov. 6.15

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \left[\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]^{0,5}} = 0,54$$

Rov. 6.14

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{y,f} / \gamma_{M1} = 22,21 \text{ kNm}$$

Rov. 6.13

Maximální ohybový moment od zatížení je $M_{Ed} = 14,4 \text{ kNm}$, tudíž průřez vyhoví.

Poznámka: Jelikož výslednice zatížení neprochází středem smyku průřezu, je nezbytné posoudit možnou interakci ohybu s vlivem klopení a kroucení.

Únosnost při boulení ve smyku

Část 6.4.3

Únosnost nevyztužených stojin při boulení ve smyku je třeba posoudit, pokud není splněna podmínka $h_w / t \geq 56,2\epsilon / \eta$.

Rov. 6.20

$$\eta = 1,20 \text{ (doporučená hodnota)}$$

$h_w / t = (h - 2t - 2r) / t = 140 / 5 = 28,0$, $56,2\epsilon / \eta = 32,67$, podmínka je splněna, není třeba posuzovat únosnost při boulení ve smyku

Příklad 12	List 7 z 7
<p>Průhyby</p> <p>Průhyby by měly být stanoveny pro příslušnou kombinaci zatížení pro mezní stav použitelnosti:</p> <p>Součinitel zatížení: $\gamma_G = 1,00$ (stálé zatížení) a $\gamma_Q = 1,00$ (proměnné zatížení)</p> <p>Stálé zatížení (G): 2 kN/m^2 a proměnné zatížení (Q): 3 kN/m^2</p> <p>Kombinace zatížení pro mezní stav použitelnosti (za předpokladu zatěžovací šířky 1 m):</p> $q = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 5,0 \text{ kN/m}$ <p>Průhyb nosníku může být stanoven podle přibližného vzorce pro výpočet rovnoměrně zatíženého prostého nosníku. Pro korozivzdornou ocel by měl být pro výpočet použit místo Youngova modulu pružnosti sečnový modul pružnosti E_S:</p> $E_S = \frac{(E_{S1} + E_{S2})}{2}$ <p>kde:</p> <p>E_{S1} je sečnový modul pružnosti odpovídající hodnotě napětí v tažené pásnici E_{S2} je sečnový modul pružnosti odpovídající hodnotě napětí v tlačené pásnici</p> <p>Hodnoty E_{S1} a E_{S2} lze pro mezní stav použitelnosti stanovit následovně::</p> $E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left(\frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad \text{kde } i = 1,2$ <p>kde:</p> <p>$\sigma_{i,Ed,ser}$ je hodnota napětí v tlačené nebo tažené pásnici pro mezní stav použitelnosti n je zpevňující součinitel; pro korozivzdornou austenitickou ocel 1.4401, $n = 7$</p> <p>Vzhledem k nelineární závislosti napětí na deformaci u korozivzdorných ocelí se hodnota modulu pružnosti mění jak po průřezu, tak i po délce prvku. Pro zjednodušení se změna hodnoty modulu pružnosti po délce prvku zanedbává a průměrná hodnota sečnových modulů pružnosti odpovídající maximálním hodnotám napětí σ_1 a σ_2 může být ve výpočtu použita v celé délce prvku.</p> <p>Hodnoty napětí v tlačené a tažené pásnici jsou vypočteny jako:</p> <p>Tlačená pásnice:</p> $\sigma_{Ed,ser,1} = \frac{M_{Ed,max}}{W_{y,sup}} = 102,1 \text{ MPa} \quad \text{a} \quad E_{S1} = 199979,2 \text{ MPa}$ <p>kde $M_{Ed,max} = 10 \text{ kNm}$ a $W_y = 97,95 \times 10^3 \text{ mm}^3$</p> <p>Tažená pásnice:</p> $\sigma_{Ed,ser,2} = \frac{M_{Ed,max}}{W_{y,inf}} = 100,8 \text{ MPa} \quad \text{a} \quad E_{S2} = 199980,8 \text{ MPa}$ <p>kde $M_{Ed,max} = 10 \text{ kNm}$ a $W_y = 99,24 \times 10^3 \text{ mm}^3$</p> <p>Konečná hodnota sečnového modulu pružnosti: $E_S = 199980,0 \text{ MPa}$</p> <p>Průhyb nosníku lze stanovit podle následujícího vzorce:</p> $d_{max} = \frac{5ql^4}{384E_S I_y}$ <p>kde $I_y = 8,297 \times 10^6 \text{ mm}^4$, $q = 5,0 \text{ kN/m}$ a $l = 4,0 \text{ m}$</p> $d_{max} = 10,0 \text{ mm}$	<p>Část 6.4.6</p> <p>EN 1991</p> <p>EN 1991</p> <p>Rov. 6.52</p> <p>Rov. 6.53</p> <p>Tabulka 6.4</p> <p>Rov. 6.53</p> <p>Rov. 6.52</p>

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST) PŘÍKLADOVÁ ČÁST	List 1 z 8					
	Název	Příklad 13 – Příhradový vazník z uzavřených průřezů				
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	Vypracoval	PTY/AAT	Dat	01/06
			Revidoval	MAP	Dat	02/06
Revidoval			MIG	Dat	06/17	

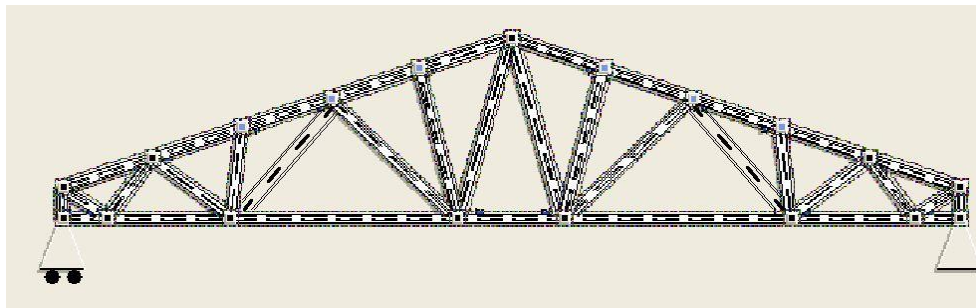
PŘÍKLAD 13 – PŘÍHRADOVÝ VAZNÍK Z UZAVŘENÝCH PRŮŘEZŮ

Příhradový vazník vynáší střešní plášť a je navržen z uzavřených čtvercových a obdélníkových průřezů z korozivzdorné oceli 1.4301; výpočet je proveden pro dvě varianty materiálu s různou mezí kluzu – pro korozivzdornou ocel v žíhaném stavu ($f_y = 210 \text{ N/mm}^2$) a korozivzdornou ocel za studena tvarovanou (s označením CP500, $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$). Posouzení profilů je provedeno pro mezní stav únosnosti a následně pro mezní stav únosnosti za požáru při požární odolnosti 30 minut. Pro materiál s označením CP500 jsou redukční součinitelé pro mechanické vlastnosti oceli za zvýšené teploty vypočteny podle kapitoly 8.2.

Pro výpočet vnitřních sil byl použit program využívající metodu konečných prvků WINRAMI od společnosti Finnish Constructional Steelwork Association (FCSA) (www.terasrakenneyhdistys.fi). V programu WINRAMI lze navrhnout čtvercové, obdélníkové i kruhové profily z korozivzdorné oceli. Pomocí programu lze stanovit vnitřní síly všech prvků vazníku, průhyby, únosnost konstrukce za běžné teploty i za požáru a únosnost styčniců za běžné teploty s uvažováním různých okrajových podmínek. Pásky vazníku jsou modelovány jako průběžné nosníky a výplňové pruty jsou k nim kloubově připojeny. Podle EN 1993-1-1 lze vzpěrnou délku pásových prutů uvažovat jako 0,9x vzdálenost mezi místy držení; dále lze vzpěrnou délku výplňových prutů uvažovat jako 0,75x vzdálenost mezi uzly – v příkladu je tato redukce konzervativně zanedbána. Vnitřní síly byly vypočteny pro korozivzdornou ocel v žíhaném stavu, následně byly tyto vnitřní síly použity i pro korozivzdornou ocel za studena tvarovanou.

V příkladu jsou kontrolovány 3 prvky vazníku: tažený dolní pás (prvek 0), tlačená diagonála (prvek 31) a horní pás namáhaný tlakem v kombinaci s ohybem (prvek 5). Vlastní tíha konstrukce je zahrnuta v softwaru.

Svařované styčnice by měly být navrženy podle kapitoly 7.4, což není náplní tohoto příkladu.



Žíhaný stav: dolní pás 100x60x4, horní pás 80x80x5, svislice 60x60x5; diagonály zleva směrem doprostřed: 50x50x3, 50x50x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3.

CP500 : dolní pás 60x40x4, horní pás 70x70x4, svislice 60x60x5, diagonály 40x40x3.

Rozpon vazníku je 15 m, výška uprostřed rozpětí je 3,13 m, výška na kraji je 0,5 m. Vlastní tíha vazníku: žíhaný stav - 407 kg, CP500 - 307 kg. Vazník není optimalizován.

Zatížení

Příhradový vazník přenáší zatížení od sněhu, od vlastní tíhy střešního pláště včetně vynášecích profilů a vlastní tíhu samotné konstrukce vazníku:

Stálé zatížení (G): Vlastní tíha střešního pláště 1 kN/m^2
Vlastní tíha vazníku (zahrnuto v programu WINRAMI)

Proměnné zatížení (Q): Zatížení sněhem 2 kN/m^2

Kombinace zatížení pro mezní stav únosnosti: $\sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$

Kombinace zatížení pro mezní stav únosnosti za požáru: $\sum_j \gamma_{GA,j} G_{k,j} + \gamma_{\psi 1,1} Q_{k,1}$

Mezní stav únosnosti (za běžné teploty) Za požáru

$\gamma_{G,j} = 1,35$ (nepříznivý účinek) $\gamma_{GA,j} = 1,0$

$\gamma_{Q,1} = 1,5$ $\gamma_{\psi 1,1} = 0,2$

(V příkladu jsou použity doporučené hodnoty součinitelů příslušného zatížení)

Přepočítání plošného zatížení na bodové zatížení:

Stálé zatížení: Vlastní tíha střešního pláště vztážená na styčník: $1,35 \times 4,1 \text{ kN}$
Vlastní tíha nosníku (zahrnuto v programu WINRAMI)

Proměnné zatížení: Zatížení sněhem vztážené na styčník: $1,5 \times 8,1 \text{ kN}$

Vnitřní síly posuzovaných prvků:

Vnitřní síly jsou stanoveny z modelu vazníku z korozivzdorné oceli v žíhaném stavu

Dolní pás, prvek 0

Žíhaný stav: $100 \times 60 \times 4 \text{ mm}$, CP500: $60 \times 40 \times 4 \text{ mm}$

$N_{t,Ed} = 142,2 \text{ kN}$, $N_{t,fi,Ed} = 46,9 \text{ kN}$

$M_{max,Ed} = 0,672 \text{ kNm}$, $M_{max,fire,Ed} = 0,245 \text{ kNm}$

Horní pás, prvek 5

Žíhaný stav: $80 \times 80 \times 5 \text{ mm}$, CP500: $70 \times 70 \times 4 \text{ mm}$

$N_{c,Ed} = -149,1 \text{ kN}$, $N_{c,fire,Ed} = -49,2 \text{ kN}$

$M_{max,Ed} = 2,149 \text{ kNm}$, $M_{max,fire,Ed} = 0,731 \text{ kNm}$

Diagonála, prvek 31

Žíhaný stav: $50 \times 50 \times 3 \text{ mm}$, CP500: $40 \times 40 \times 3 \text{ mm}$

$N_{c,Ed} = -65,9 \text{ kN}$, $N_{c,fire,Ed} = -21,7 \text{ kN}$

Materiálové charakteristiky

Korozivzdorná ocel 1.4301.

Žíhaný stav: $f_y = 210 \text{ N/mm}^2$ $f_u = 520 \text{ N/mm}^2$ $E = 200000 \text{ N/mm}^2$

CP500: $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ $f_u = 650 \text{ N/mm}^2$ $E = 200000 \text{ N/mm}^2$

Součinitel materiálu

V příkladu jsou použity následující součinitele materiálu:

$\gamma_{M0} = 1,1$, $\gamma_{M1} = 1,1$, $\gamma_{M,fi} = 1,0$

Průřezové charakteristiky – žíhaný stav

Prvek 0: $A = 1175 \text{ mm}^2$ $W_{pl,y} = 37,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$

Prvek 5: $A = 1436 \text{ mm}^2$ $I_y = 131,44 \times 10^4 \text{ mm}^4$ $i_y = 30,3 \text{ mm}$ $W_{pl,y} = 39,74 \times 10^3 \text{ mm}^3$

Prvek 31: $A = 541 \text{ mm}^2$ $I_y = 19,47 \times 10^4 \text{ mm}^4$ $i_y = 19 \text{ mm}$ $W_{pl,y} = 9,39 \times 10^3 \text{ mm}^3$

EN 1990

EN 1990
EN 1991-1-2

Tabulka 2.2

Tabulka 2.3

Tabulka 4.1 a
Část 8.1

Průřezové charakteristiky - CP500

Prvek 0:	$A = 695 \text{ mm}^2$			$W_{pl,y} = 13,16 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Prvek 5:	$A = 1015 \text{ mm}^2$	$I_y = 72,12 \times 10^4 \text{ mm}^4$	$i_y = 26,7 \text{ mm}$	$W_{pl,y} = 24,76 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Prvek 31:	$A = 421 \text{ mm}^2$	$I_y = 9,32 \times 10^4 \text{ mm}^4$	$i_y = 14,9 \text{ mm}$	$W_{pl,y} = 5,72 \times 10^3 \text{ mm}^3$

Zatřídění průřezu tlačných prvků 5 a 31

Žíhaný stav : $\varepsilon = 1,03$ CP500 : $\varepsilon = 0,698$

Žíhaný stav 80x80x5 : $c = 80 - 15 = 65 \text{ mm}$ CP500 70x70x4 : $c = 70 - 12 = 58 \text{ mm}$

Žíhaný stav 50x50x3 : $c = 50 - 9 = 41 \text{ mm}$ CP500 40x40x3 : $c = 40 - 9 = 31 \text{ mm}$

Pásnice/stojina v tlaku:

Žíhaný stav 80x80x5 : $c/t = 13$ CP500 70x70x4 : $c/t = 14,5$

Žíhaný stav 50x50x3 : $c/t = 13,7$ CP500 40x40x3 : $c/t = 10,3$

Pro třídu 1 je splněna podmínka $\frac{c}{t} \leq 33,0\varepsilon$, proto jsou průřezy třídy 1

DOLNÍ PÁS – POSOUZENÍ PRŮŘEZU ZA BĚŽNÉ TEPLoty A ZA POŽÁRU**A) Za běžné teploty****Únosnost průřezu v tahu**

$$N_{pl,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0}$$

Žíhaný stav: $N_{pl,Rd} = 1175 \times 210 / 1,1 = 224,3 \text{ kN} > 142,2 \text{ kN OK}$

CP500: $N_{pl,Rd} = 695 \times 460 / 1,1 = 290,6 \text{ kN} > 142,2 \text{ kN OK}$

Únosnost průřezu v ohybu

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0}$$

Žíhaný stav: $M_{c,Rd} = \frac{37,93 \times 10^3 \times 210}{1,1 \times 10^6} = 7,24 \text{ kNm} > 0,672 \text{ kNm OK}$

CP500: $M_{c,Rd} = \frac{13,16 \times 10^3 \times 460}{1,1 \times 10^6} = 5,50 \text{ kNm} > 0,672 \text{ kNm OK}$

Únosnost průřezu v kombinaci tahu a ohybu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

Žíhaný stav: $\frac{142,2}{224,3} + \frac{0,672}{7,24} = 0,73 \leq 1 \quad \text{OK}$

CP500: $\frac{142,2}{290,6} + \frac{0,672}{5,50} = 0,61 \leq 1 \quad \text{OK}$

B) Za požáru

$\varepsilon_{res} = 0,4$

Teplota oceli pro profil 100x60x4 po 30 min požáru pro $A_m/V = 275 \text{ m}^{-1}$: $\theta = 833 \text{ }^\circ\text{C}$.

Teplota oceli pro profil 60x40x4 po 30 min požáru pro $A_m/V = 290 \text{ m}^{-1}$: $\theta = 834 \text{ }^\circ\text{C}$.

Konzervativně je dále uvažována teplota $\theta = 834 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabulka 5.2

Tabulka 5.2

(Prvek 0)

Část 5.7.2

Rov. 5.23

Rov. 5.29

Rov. 6.55

Část 8.4.4

Žíhaný stav:

Hodnota redukčního součinitele pro teplotu 834 °C je vypočtena lineární interpolací:

$$k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_y = 0,292, \text{ ale } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

$$k_{u,\theta} = f_{u,\theta}/f_u = 0,209$$

$$f_{2,\theta} = 0,292 \times 210 = 61,3 \text{ a } f_{u,\theta} = 0,209 \times 520 = 108,7, \text{ proto } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

CP500 :

V případě za studena tvarovaných průřezů pro teplotu $\theta \geq 800$ °C:

$$k_{2,\theta,CF} = f_{2,\theta,CF}/f_y = 0,9k_{2,\theta} = 0,9 \times 0,292 = 0,263, \text{ ale } f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$$

$$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta} = f_{u,\theta,CF}/f_u = 0,209$$

$$f_{2,\theta,CF} = 0,263 \times 460 = 121,0 \text{ a } f_{u,\theta,CF} = 0,209 \times 650 = 135,9, \text{ proto } f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$$

Únosnost průřezu v tahu

$$N_{\bar{n},\theta,Rd} = k_{2,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,\bar{n}}]$$

$$\text{Žíhaný stav: } N_{\bar{n},\theta,Rd} = 0,292 \times 224,3 \times 1,1 / 1,0 = 72,0 \text{ kN} > 46,9 \text{ kN OK}$$

$$\text{CP500: } N_{\bar{n},\theta,Rd} = 0,263 \times 290,6 \times 1,1 / 1,0 = 84,1 \text{ kN} > 46,9 \text{ kN OK}$$

Únosnost průřezu v ohybu

$$M_{\bar{n},\theta,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,\bar{n}}]$$

$$\text{Žíhaný stav: } M_{\bar{n},\theta,Rd} = 0,292 \times 7,24 \times 1,1 / 1,0 = 2,33 \text{ kNm} > 0,245 \text{ kNm OK}$$

$$\text{CP500: } M_{\bar{n},\theta,Rd} = 0,263 \times 5,50 \times 1,1 / 1,0 = 1,59 \text{ kNm} > 0,245 \text{ kNm OK}$$

Únosnost průřezu v kombinaci tahu a ohybu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

$$\text{Žíhaný stav: } \frac{46,9}{72,0} + \frac{0,245}{2,33} = 0,75 \leq 1 \quad \text{OK}$$

$$\text{CP500: } \frac{46,9}{84,1} + \frac{0,245}{1,59} = 0,71 \leq 1 \quad \text{OK}$$

DIAGONÁLA – POSOUZENÍ PRŮŘEZU ZA BĚŽNÉ TEPLoty A ZA POŽÁRU

(Prvek 31)

Vzpěrná délka = 1253 mm

A) Za běžné teploty

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

Rov. 6.2

Žíhaný stav:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{f_y / E} = \frac{1253}{19} \frac{1}{\pi} \sqrt{(210 / 200000)} = 0,680$$

Rov. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,680 - 0,3) + 0,680^2) = 0,824$$

Rov. 6.5
Tabulka 6.1

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,824 + \sqrt{(0,824^2 - 0,680^2)}} = 0,776$$

Rov. 6.4

$$N_{b,Rd} = 0,776 \times 541 \times 210 / 1,1 = 80,1 \text{ kN} > 65,9 \text{ kN OK.}$$

CP500:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1253}{14,9} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{(460 / 200000)} = 1,284$$

Rov. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (1,284 - 0,3) + 1,284^2) = 1,565$$

Rov. 6.5
Tabulka 6.1

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}^2)}} = \frac{1}{1,565 + \sqrt{(1,565^2 - 1,284^2)}} = 0,407$$

Rov. 6.4

$$N_{b,Rd} = 0,407 \times 421 \times 460 / 1,1 = 71,7 \text{ kN} > 65,9 \text{ kN} \text{ OK.}$$

B) Za požáru

$$\varepsilon_{res} = 0,4$$

Část 8.4.4

Teplota oceli pro profil 80x80x5 po 30 minutách požáru pro $A_m/V = 220 \text{ m}^{-1}$: $\theta = 830 \text{ }^\circ\text{C}$.Teplota oceli pro profil 70x70x5 po 30 minutách požáru pro $A_m/V = 225 \text{ m}^{-1}$: $\theta = 831 \text{ }^\circ\text{C}$.Konzervativně je dále uvažována teplota $\theta = 831 \text{ }^\circ\text{C}$.

Žíhaný stav:

Hodnota redukčního součinitele pro teplotu $831 \text{ }^\circ\text{C}$ je vypočtena lineární interpolací:Část 8.2
Tabulka 8.1

$$k_{p0,2,\theta} = 0,219 \text{ a } k_{E,\theta} = 0,574$$

Zatřídění průřezu

Část 8.3.2

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{-0,5} = 1,03 \times \left[\frac{0,574}{0,219} \right]^{-0,5} = 1,67$$

Rov. 8.6

Pro průřez třídy 1 musí platit: $c/t \leq 33,0 \varepsilon_\theta = 33,0 \times 1,67 = 55,1$ Podmínka je splněna, $c/t = 13$, proto je průřez třídy 1.

CP500:

V případě za studena tvarovaných průřezů pro teplotu $\theta \geq 800 \text{ }^\circ\text{C}$:Část 8.2
Tabulka 8.1

$$k_{p0,2,\theta,CF} = 0,8 k_{p0,2,\theta} = 0,8 \times 0,219 = 0,175$$

$$k_{E,\theta,CF} = k_{E,\theta} = 0,574$$

Zatřídění průřezu

Část 8.3.2

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{-0,5} = 0,698 \times \left[\frac{0,574}{0,175} \right]^{-0,5} = 1,26$$

Rov. 8.6

Pro průřez třídy 1 musí platit: $c/t \leq 33,0 \varepsilon_\theta = 33,0 \times 1,26 = 41,6$ Podmínka je splněna, $c/t = 14,5$, proto je průřez třídy 1.

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{p0,2,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \text{ (oba profily jsou průřezy třídy 1)}$$

Rov. 8.10

Žíhaný stav:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,\theta} / k_{E,\theta})} = 0,680 \times \sqrt{(0,219 / 0,574)} = 0,420$$

Rov. 8.14

$$\phi_\theta = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_\theta^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,420 - 0,3) + 0,420^2) = 0,618$$

Rov. 8.13

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_0 + \sqrt{(\phi_0^2 - \bar{\lambda}_0^2)}} = \frac{1}{0,618 + \sqrt{(0,618^2 - 0,420^2)}} = 0,933$$

Rov. 8.12

$$N_{b,fi,t,Rd} = 0,933 \times 541 \times 0,219 \times 210 / 1,0 = 23,2 \text{ kN} > 21,7 \text{ kN OK.}$$

CP500:

$$\bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,0,CF} / k_{E,0,CF})} = 1,284 \times \sqrt{(0,175 / 0,574)} = 0,709$$

Rov. 8.14

$$\phi_0 = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_0 - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_0^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,709 - 0,3) + 0,709^2) = 0,852$$

Rov. 8.13

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_0 + \sqrt{(\phi_0^2 - \bar{\lambda}_0^2)}} = \frac{1}{0,852 + \sqrt{(0,852^2 - 0,709^2)}} = 0,755$$

Rov. 8.12

$$N_{b,fi,t,Rd} = 0,755 \times 421 \times 0,175 \times 460 / 1,0 = 25,6 \text{ kN} > 21,7 \text{ kN OK.}$$

HORNÍ PÁS – POSOUZENÍ PRŮŘEZU ZA BĚŽNÉ TEPLoty A ZA POŽÁRU

(Prvek 5)

Vzpěrná délka = 1536 mm

A) Za běžné teploty

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{w,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1,0$$

Rov. 6.56

Žíhaný stav:

$$\beta_{w,y} = 1,0 \quad \text{pro průřez třídy 1}$$

Část 6.5.2

$$k_y = 1 + D_1(\bar{\lambda}_y - D_2)N_{Ed}/N_{b,Rd,y}, \text{ ale } k_y \leq 1 + D_1(D_3 - D_2)N_{Ed}/N_{b,Rd,y}$$

Rov. 6.63

$$\text{kde } D_1 = 2,0, D_2 = 0,3 \text{ a } D_3 = 1,3$$

Tabulka 6.6

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1536}{30,3} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{(210 / 200000)} = 0,523$$

Rov. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,523 - 0,3) + 0,523^2) = 0,691$$

Rov. 6.5

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}^2)}} = \frac{1}{0,691 + \sqrt{(0,691^2 - 0,523^2)}} = 0,875$$

Rov. 6.4

$$N_{b,Rd,y} = 0,875 \times 1436 \times 210 / 1,1 = 239,9 \text{ kN} > 149,1 \text{ kN}$$

Rov. 6.2

$$k_y = 1,0 + 2,0 \times (0,523 - 0,30) \times 149,1 / 239,9 = 1,277$$

Tabulka 6.6

$$k_y \leq 1,0 + 2,0 \times (1,3 - 0,30) \times 149,1 / 239,9 = 2,243, \text{ proto } k_y = 1,277$$

$$\frac{149,1}{239,9} + 1,277 \times \left(\frac{2,149 \times 1000^2}{1,0 \times 39,74 \times 10^3 \times 210 / 1,1} \right) = 0,98 < 1,0 \text{ OK.}$$

Rov. 6.56

CP500:

$$\beta_{w,y} = 1,0 \quad \text{pro průřez třídy 1}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1536}{26,7} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{(460 / 200000)} = 0,878$$

Rov. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,878 - 0,3) + 0,878^2) = 1,027$$

Rov. 6.5

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \lambda^2)}} = \frac{1}{1,027 + \sqrt{(1,027^2 - 0,878^2)}} = 0,641$$

$$N_{b,Rd,y} = 0,641 \times 1015 \times 460 / 1,1 = 272,1 \text{ kN} > 149,1 \text{ kN}$$

$$k_y = 1,0 + 2 \times (0,878 - 0,30) \times 149,1 / 272,1 = 1,633$$

$$k_y \leq 1,0 + 2,0 \times (1,3 - 0,30) \times 149,1 / 272,1 = 2,096, \text{ proto } k_y = 1,633$$

$$\frac{149,1}{272,1} + 1,633 \times \left(\frac{2,149 \times 1000^2}{1,0 \times 24,76 \times 10^3 \times 460 / 1,1} \right) = 0,89 < 1,0 \text{ OK.}$$

Rov. 6.4

Rov. 6.2

Tabulka 6.6

Rov. 6.56

B) Za požáru

$$\varepsilon_{res} = 0,4$$

Teplota oceli pro profil 50x50x3 po 30 minutách požáru pro $A_m/V = 370 \text{ m}^{-1}$: $\theta = 836 \text{ }^\circ\text{C}$.

Teplota oceli pro profil 40x40x3 po 30 minutách požáru pro $A_m/V = 380 \text{ m}^{-1}$: $\theta = 836 \text{ }^\circ\text{C}$.

Část 8.4.4

Žíhaný stav:

Hodnota redukčního součinitele pro teplotu $836 \text{ }^\circ\text{C}$ je vypočtena lineární interpolací:

$$k_{p0,2,\theta} = 0,214$$

$$k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_y = 0,289, \text{ ale } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

$$k_{u,\theta} = f_{u,\theta}/f_u = 0,207$$

$$f_{2,\theta} = 0,289 \times 210 = 60,7 \text{ a } f_{u,\theta} = 0,207 \times 520 = 107,6, \text{ proto } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

$$k_{E,\theta} = 0,565$$

Část 8.2
Tabulka 8.1**Zatřídění průřezu**

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{-0,5} = 1,03 \times \left[\frac{0,565}{0,214} \right]^{-0,5} = 1,67$$

Pro průřez třídy 1 musí platit: $c/t \leq 33,0 \varepsilon_\theta = 33,0 \times 1,67 = 55,1$

Podmínka je splněna, $c/t = 13,7$, proto je průřez třídy 1.

Část 8.3.2

Rov. 8.6

CP500:

V případě za studena tvarovaných průřezů pro teplotu $\theta \geq 800 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$k_{p0,2,\theta,CF} = 0,8 k_{p0,2,\theta} = 0,8 \times 0,214 = 0,171$$

$$k_{2,\theta,CF} = f_{2,\theta,CF}/f_y = 0,9 k_{2,\theta} = 0,9 f_{2,\theta}/f_y = 0,9 \times 0,289 = 0,260, \text{ ale } f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$$

$$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta} = f_{u,\theta,CF}/f_u = 0,207$$

$$f_{2,\theta,CF} = 0,260 \times 460 = 94,8 \text{ a } f_{u,\theta,CF} = 0,207 \times 650 = 134,6, \text{ proto } f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$$

$$k_{E,\theta,CF} = k_{E,\theta} = 0,565$$

Část 8.2
Tabulka 8.1**Zatřídění průřezu**

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{-0,5} = 0,698 \times \left[\frac{0,565}{0,171} \right]^{-0,5} = 1,27$$

Pro průřez třídy 1 musí platit: $c/t \leq 33,0 \varepsilon_\theta = 33,0 \times 1,27 = 41,9$

Podmínka je splněna, $c/t = 10,3 < 41,9$, proto je průřez třídy 1.

Část 8.3.2

Rov. 8.6

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A_g k_{p0,2,0} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,0,Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{oba profily jsou průřezy třídy 1})$$

Rov. 8.26

Žíhaný stav:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,0} / k_{E,\theta})} = 0,523 \times \sqrt{(0,214 / 0,565)} = 0,322$$

Rov. 8.14

$$\phi_\theta = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_\theta^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,322 - 0,3) + 0,322^2) = 0,557$$

Rov. 8.13

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_\theta + \sqrt{(\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2)}} = \frac{1}{0,557 + \sqrt{(0,557^2 - 0,322^2)}} = 0,989$$

Rov. 8.12

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A_g k_{p0,2,0} f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 3$$

Rov. 8.30

$$\mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3)\bar{\lambda}_{y,0} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8$$

Rov. 8.31

$$\chi_{min,fi} A_g k_{p0,2,0} f_y / \gamma_{M,fi} = 0,989 \times 1436 \times 0,214 \times 210 / 1,0 = 63,8 \text{ kN} > 49,2 \text{ kN OK.}$$

Rov. 8.26

$$M_{y,fi,0,Rd} = k_{2,0} [\gamma_{M0} \gamma_{M,fi}] M_{Rd} = 0,289 \times 1,1 / 1,0 \times 39,74 \times 10^3 \times 210 / 1000^2 = 2,65 \text{ kNm}$$

$$> 0,731 \text{ kNm OK.}$$

Rov. 8.15

$$\psi = -0,487 / 0,731 = -0,666$$

Tabulka 8.3

$$\beta_{M,y} = 1,8 - 0,7\psi = 2,266$$

$$\mu_y = (1,2 \times 2,266 - 3) \times 0,322 + 0,44 \times 2,266 - 0,29 = 0,617 < 0,8$$

$$k_y = 1 - 0,617 \times 49,2 \text{ kN} / 63,8 \text{ kN} = 0,524 < 3$$

$$\frac{49,2}{63,8} + 0,524 \times \frac{0,731}{2,65} = 0,92 < 1,0 \quad \text{OK.}$$

CP500:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,0} / k_{E,\theta})} = 0,878 \times \sqrt{(0,171 / 0,565)} = 0,483$$

Rov. 8.14

$$\phi_\theta = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_\theta^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,483 - 0,3) + 0,483^2) = 0,661$$

Rov. 8.13

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_\theta + \sqrt{(\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2)}} = \frac{1}{0,661 + \sqrt{(0,661^2 - 0,483^2)}} = 0,899$$

Rov. 8.12

$$\chi_{min,fi} A_g k_{p0,2,0} f_y / \gamma_{M,fi} = 0,899 \times 1015 \times 0,171 \times 460 / 1,0 = 71,8 \text{ kN} > 49,2 \text{ kN OK.}$$

Rov. 8.26

$$M_{y,fi,0,Rd} = k_{2,0} [\gamma_{M0} \gamma_{M,fi}] M_{Rd} = 0,260 \times 1,1 / 1,0 \times 24,76 \times 10^3 \times 460 / 1000^2 = 3,26 \text{ kNm}$$

$$> 0,731 \text{ kNm OK.}$$

Rov. 8.15

$$\psi = -0,487 / 0,731 = -0,666$$

Tabulka 8.3

$$\beta_{M,y} = 1,8 - 0,7\psi = 2,266$$

$$\mu_y = (1,2 \times 2,266 - 3) \times 0,483 + 0,44 \times 2,266 - 0,29 = 0,571 \leq 0,8$$

$$k_y = 1 - 0,571 \times 49,2 / 71,8 = 0,609$$

$$\frac{49,2}{71,8} + 0,609 \times \frac{0,731}{3,26} = 0,82 < 1,0 \quad \text{OK.}$$

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)	List 1 z 3			
	Název	Příklad 14 – Stanovení zvýšené průměrné meze kluzu pro za studena tvarované průřezy		
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	Vypracoval SA	Dat 05/17
			Revidoval FW	Dat 05/17
		Revidoval LG	Dat 05/17	
PŘÍKLADOVÁ ČÁST				

PŘÍKLAD 14 – STANOVENÍ ZVÝŠENÉ PRŮMĚRNÉ MEZE KLUZU PRO ZA STUDENA TVAROVANÉ PRŮŘEZY

Příklad ukazuje možné stanovení zvýšené meze kluzu f_{ya} za studena tvarovaného uzavřeného čtvercového průřezu (HTR) v souladu s přílohou B. Výpočet je proveden pro průřez HTR 80×80×4 z korozivzdorné austenitické oceli 1.4301. V příkladu je názorně ukázán rozdíl výsledků při stanovení únosnosti průřezu v ohybu s uvážením minimální meze kluzu f_y a zvýšené průměrné meze kluzu f_{ya} .

Zvýšená průměrná mez kluzu

Pro uzavřené za studena tvarované průřezy z korozivzdorné oceli, lze stanovit zvýšenou průměrnou mez kluzu f_{ya} jako:

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,rolled} + f_{yf}(A - A_{c,rolled})}{A}$$

Rov. B.2

Průřezové charakteristiky

Průřezové charakteristiky profilu HTR 80×80×4 jsou:

$$h = 79,9 \text{ mm} \quad b = 79,6 \text{ mm}$$

$$t = 3,75 \text{ mm} \quad A = 1099 \text{ mm}^2$$

$$W_{el} = 25967 \text{ mm}^3 \quad W_{pl} = 30860 \text{ mm}^3$$

$r_i = 4,40 \text{ mm}$ (poloměr r_i může být stanoven jako $2t$)

Příloha B

$$A_{c,rolled} = \left(n_c \pi \frac{t}{4} \right) (2r_i + t) + 4n_c t^2$$

Rov. B.14

$$A_{c,rolled} = \left(4 \times \pi \times \frac{3,75}{4} \right) \times (2 \times 4,40 + 3,75) + 4 \times 4 \times 3,75^2 = 373 \text{ mm}^2$$

Materiálové charakteristiky

$f_y = 230 \text{ N/mm}^2$ a $f_u = 540 \text{ N/mm}^2$ (pro pás válcovaný za studena tloušťky $t \leq 8 \text{ mm}$)

Tabulka 2.2

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

Část 2.3.1

$$\varepsilon_{p0,2} = 0,002 + f_y/E = 0,00315$$

Rov. B.10

$$\varepsilon_u = 1 - f_y/f_u = 0,57$$

Rov. C.6

Zvýšené meze kluzu pro jednotlivé části průřezu

Předpokládána zvýšená mez kluzu v rohových oblastí f_{yc} :

$$f_{yc} = 0,85K (\varepsilon_c + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad a \quad f_y \leq f_{yc} \leq f_u$$

Rov. B.4

Příklad 14	List 2 z 3
<p>Předpokládaná zvýšená mez kluzu v rovné části průřezu f_{yf}:</p> $f_{yf} = 0,85K (\varepsilon_f + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad \text{a} \quad f_y \leq f_{yf} \leq f_u$ <p>Deformace rohových a rovných částí průřezu způsobené tvarováním průřezu</p> <p>Deformace ε_c v rohové oblasti způsobené tvarováním průřezu:</p> $\varepsilon_c = \frac{t}{2(2r_i + t)}$ $\varepsilon_c = \frac{3,75}{2 \times (2 \times 4,40 + 3,75)} = 0,149$ <p>Deformace ε_f v rovné části způsobené tvarováním průřezu:</p> $\varepsilon_f = \left[\frac{t}{900} \right] + \left[\frac{\pi t}{2(b + h - 2t)} \right]$ $\varepsilon_f = \left[\frac{3,75}{900} \right] + \left[\frac{\pi \times 3,75}{2 \times (79,6 + 79,9 - 2 \times 3,75)} \right] = 0,043$ <p>Parametry materiálového modelu</p> $n_p = \frac{\ln(f_y/f_u)}{\ln(\varepsilon_{p0,2}/\varepsilon_u)}$ $n_p = \frac{\ln(230/540)}{\ln(0,00315/0,57)} = 0,164$ $K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}}$ $K = \frac{230}{(0,00315)^{0,164}} = 591,6 \text{ N/mm}^2$ <p>Předpokládaná zvýšená mez kluzu v rohových oblastech f_{yc}:</p> $f_{yc} = 0,85 \times 591,6 \times (0,149 + 0,00315)^{0,164}$ $= 369 \text{ N/mm}^2 \text{ a } 230 \leq 369 \leq 540$ <p>Předpokládaná zvýšená mez kluzu v rovných částech průřezu f_{yf}:</p> $f_{yf} = 0,85 \times 591,6 \times (0,043 + 0,00315)^{0,164}$ $= 304 \text{ N/mm}^2 \text{ a } 230 \leq 304 \leq 540$ <p>Zvýšená průměrná mez kluzu průřezu</p> $f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,rolled} + f_{yf}(A - A_{c,rolled})}{A}$ $= \frac{369 \times 373 + 304 \times (1099 - 373)}{1099} = 326 \text{ N/mm}^2$	<p>Rov. B.5</p> <p>Rov. B.7</p> <p>Rov. B.8</p> <p>Rov. B.12</p> <p>Rov. B.11</p> <p>Rov. B.4</p> <p>Rov. B.5</p> <p>Rov. B.2</p>

Příklad 14	List 3 z 3
<p>Zatřídění průřezu</p> <p>Zatřídění průřezu pro minimální mez kluzu f_y:</p> $\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[\frac{235}{230} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,986$ $\frac{c}{t} = \frac{(79,9 - 3 \times 3,75)}{3,75} = 18,3 < 32,5 = 33\varepsilon$ <p>Průřez je třídy 1.</p> <p>Zatřídění průřezu pro zvýšenou průměrnou mez kluzu f_y:</p> $\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[\frac{235}{326} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,829$ $\frac{c}{t} = \frac{(79,9 - 3 \times 3,75)}{3,75} = 18,3 < 27,4 = 33\varepsilon$ <p>Průřez je třídy 1.</p> <p>Únosnost průřezu v ohybu</p> <p>Pro průřezy třídy 1 a 2 platí:</p> $M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0}$ <p>Únosnost průřezu s uvážením minimální meze kluzu f_y:</p> $M_{c,Rd} = \frac{30860 \times 230}{1,1} = 6,45 \text{ kNm}$ <p>Únosnost průřezu s uvážením zvýšené průměrné meze kluzu f_{ya}:</p> $M_{c,Rd} = \frac{30860 \times 326}{1,1} = 9,15 \text{ kNm}$ <p>V případě zohlednění zvýšené průměrné meze kluzu při výpočtu je stanovená únosnost průřezu o 42% vyšší než ve výpočtu s uvážením minimální meze kluzu.</p> <p>Poznámka: V příkladu 15 je dále ukázáno stanovení zvýšení ohybové únosnosti průřezu při uvažování vlivu zpevnění materiálu pomocí metody CSM (Continuous Strength Method), která je podrobně popsána v příloze D.</p>	<p>Tabulka 5.2</p> <p>Tabulka 5.2</p> <p>Rov. 5.29</p>

Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST) Příkladová část	List 1 z 2		
	Název	Příklad 15 – Návrh průřezu na ohyb metodou CSM	
	Klient	Výzkumný fond pro uhlí a ocel	Vypracoval SA
		Revidoval FW	Dat 05/17
		Revidoval LG	Dat 05/17

PŘÍKLAD 15 – NÁVRH PRŮŘEZU NA OHYB METODOU CSM (CONTINUOUS STRENGTH METHOD) V příkladu je znázorněno možné stanovení ohybové únosnosti nosníku (v rovině větší tuhosti) z korozivzdorné oceli 1.4301 metodou CSM (Continuous Strength Method), která je podrobně popsána v příloze D. Jedná se o za studena válcovaný čtvercový průřez o rozměrech 80×80×4 mm. Průřezové charakteristiky Průřezové charakteristiky jsou převzaty z příkladu 14 Materiálové charakteristiky Mez kluzu $f_y = 326 \text{ N/mm}^2$ * a mez pevnosti $f_u = 540 \text{ N/mm}^2$ $E = 200000 \text{ N/mm}^2$ a $\nu = 0,3$ $\epsilon_y = f_y/E = 0,0016$ $\epsilon_u = 1 - f_y/f_u = 0,40$ * Pro ilustraci zvýšené ohybové únosnosti průřezu stanovené metodou CSM je mez kluzu brána jako průměrná zvýšená mez kluzu z příkladu 14. Mez kluzu může být pro výpočet brána i jako minimální mez kluzu. Štíhlost průřezu $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,p}}}$ $f_{cr,p} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2} = \frac{4 \times \pi^2 \times 200000 \times 3,75^2}{12 \times (1 - 0,3^2) \times (79,7 - 2(3,75 + 4,40))^2} = 2530 \text{ N/mm}^2$ $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{326}{2530}} = 0,36 (< 0,68)$ Deformační kapacita průřezu $\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \epsilon_u}{\epsilon_y}\right) \quad \text{pro } \bar{\lambda}_p \leq 0,68$ Z tab. D.1, $C_1 = 0.1$ pro austenitickou korozivzdornou ocel.	Tabulka 2.2 Část 2.3.1 Rov. C.6 D.3.2 Rov. D.4 a Tabulka 5.3 Rov. D.2 Tabulka D.1
--	--

$$\frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{0,36^{3,6}} = 9,9 \leq \min\left(15, \frac{0,1 \times 0,40}{0,0016} = 25\right)$$

$$\Rightarrow \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} = 9,9$$

Modul pružnosti s vlivem zpevnění

Z tab. D.1, $C_2 = 0,16$ pro austenitickou korozivzdornou ocel

$$E_{\text{sh}} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \varepsilon_u - \varepsilon_y} = \frac{540 - 326}{0,16 \times 0,40 - 0,0016} = 3429 \text{ N/mm}^2$$

Únosnost průřezu v ohybu (v rovině větší tuhosti)

$$M_{\text{c,Rd}} = M_{\text{csm,Rd}} = \frac{W_{\text{pl}} f_y}{\gamma_{\text{M0}}} \left[1 + \frac{E_{\text{sh}} W_{\text{el}}}{E W_{\text{pl}}} \left(\frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left(1 - \frac{W_{\text{el}}}{W_{\text{pl}}} \right) / \left(\frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} \right)^\alpha \right]$$

$\alpha = 2,0$ pro čtyřhranný profil

$$\begin{aligned} M_{\text{c,Rd}} &= M_{\text{csm,Rd}} \\ &= \frac{30860 \times 326}{1,1} \times \left[1 + \frac{3429}{200000} \times \frac{25967}{30860} \times (9,9 - 1) - \left(1 - \frac{25967}{30860} \right) / (9,9)^{2,0} \right] \end{aligned}$$

$$M_{\text{c,Rd}} = 10,31 \text{ kNm}$$

Únosnost průřezu v ohybu s uvážením zaručené meze kluzu stanovené v příkladu 14 je 6,45 kNm. Únosnost průřezu v ohybu s uvážením průměrné zvýšené meze kluzu stanovené v příkladu 14 je 9,15 kNm. Únosnost průřezu v ohybu s uvážením průměrné zvýšené meze kluzu stanovené metodou CSM je 10,31 kNm. Při porovnání výsledků je zřejmý 60% rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou únosnosti průřezu v ohybu ohybové únosnosti průřezu.

Tabulka D.1

Rov. D.1

Rov. D.9

Tabulka D.2