

Univerza
v Ljubljani Fakulteta
za
gradbeništvo
in geodezijo



ŽIGA NOVAK

SPOJI V KONSTRUKCIJAH IZ NERJAVNIH JEKEL

DIPLOMSKA NALOGA

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE
OPERATIVNO GRADBENIŠTVO**

Ljubljana, 2023

Univerza
v Ljubljani Fakulteta
za gradbeništvo in
geodezijo



Kandidat:

ŽIGA NOVAK

SPOJI V KONSTRUKCIJAH IZ NERJAVNIH JEKEL

Diplomska naloga št.:

JOINTS IN STRUCTURES MADE OF STAINLESS STEEL

Graduation thesis No.:

Mentorica:
doc. dr. Sara Piculin

Predsednik komisije:

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	62-112.8:624.014.2(043.2)
Avtor:	Žiga Novak
Mentorica:	doc. dr. Sara Piculin
Naslov:	Spoji v konstrukcijah iz nerjavnih jekel
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski študij
Obseg in oprema:	43 str., 4 pregl., 18 sl.
Ključne besede:	Nerjavno jeklo, SIST EN 1993-1-4, spoji, dimenzioniranje spojev

Izvleček

V diplomski nalogi so predstavljene posebnosti dimenzioniranja spojev v konstrukcijah iz nerjavnih jekel v primerjavi z ogljikovimi jekli v skladu z Evrokod standardi in spremembe v prihajajoči novi generaciji standarda. Manjša vsebnost ogljika nerjavnih jekel v primerjavi z ogljikovimi jim daje večjo duktilnost. To privede do drugačne napetostno-deformacijske krivulje nerjavnega jekla, zaradi katere pride do razlik pri dimenzioniranju v primerjavi z ogljikovimi jekli. Prvi del diplomske naloge predstavlja fizikalne in mehanske lastnosti nerjavnih jekel, ki so posledica dodanih legirnih elementov in mikrostrukture nerjavnega jekla ter korozijsko odpornost nerjavnih jekel. Drugi del predstavlja posebnosti dimenzioniranja vijačenih in varjenih spojev iz nerjavnega jekla po SIST EN1993-1-4 ter predstandardu prEN1993-1-4. Na koncu so podani še računski primeri.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 62-112.8:624.014.2(043.2)
Author: Žiga Novak
Supervisor: Assist. Prof. Sara Piculin, Ph.D
Title: Joints in structures made of stainless steel
Document type: Graduation Thesis – Higher professional studies
Scope and tools: 43 p., 4 tab., 18 fig.
Keywords: Stainless steel, SIST EN 1993-1-4, joints, joint design

Abstract

The diploma thesis addresses the peculiarities of designing connections in structures made of stainless steel compared to carbon steel in accordance with Eurocode standards and changes in the upcoming new generation of standards. The lower carbon content in stainless steels compared to carbon steels provides them with greater ductility. This leads to a different stress-strain curve for stainless steel, which results in differences in design compared to carbon steels. The first part of the thesis introduces the physical and mechanical properties of stainless steels, which are influenced by added alloying elements and the microstructure of stainless steel, as well as the corrosion resistance of stainless steels. The second part presents the specificities of designing bolted and welded joints made of stainless steel according to SIST EN1993-1-4 and the pre-standard prEN1993-1-4. Finally, computational examples are provided.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici doc. dr. Sari Piculin za nasvete in pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

KAZALO VSEBINE

POPRAVKI – ERRATA.....	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	III
ZAHVALA.....	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO PREGLEDNIC	VI
KAZALO SLIK.....	VII
1 UVOD.....	1
2 NERJAVNA JEKLA.....	3
2.1 Uporaba nerjavnih jekel v konstrukcijah	4
2.2 Legirni elementi.....	7
2.3 Napetostno-deformacijska krivulja nerjavnih jekel	10
2.4 Fizikalne lastnosti nerjavnega jekla	13
2.5 Korozija nerjavnih jekel.....	13
2.5.1 Oblike korozije nerjavnih jekel.....	14
2.5.2 Korozija v določenih okoljih.....	16
3 VIJAČENI SPOJI V KONSTRUKCIJAH IZ NERJAVNIH JEKEL	18
3.1 Splošno	18
3.2 Vijaki	19
3.3 Prednapeti vijaki	20
3.4 Luknje za vijake	21
3.5 Dimenzioniranje vijačenih spojev.....	21
3.5.1 Pozicija lukenj.....	21
3.5.2 Nosilnost na bočni pritisk.....	22
3.5.2.1 Koeficienti nosilnosti na bočni pritisk pri spoju s priključno pločevino debeline $t > 4$ mm	23
3.5.2.2 Koeficienti nosilnosti na bočni pritisk pri spoju s priključno pločevino debeline $t < 4$ mm	24
3.5.3 Natezna nosilnost vijakov	26
3.5.4 Strižna nosilnost vijakov	26
3.5.5 Natezna in strižna nosilnost vijakov.....	27
3.5.6 Torna nosilnost.....	28
4 VARJENI SPOJI V KONSTRUKCIJAH IZ NERJAVNIH JEKEL.....	30
4.1 Splošno	30
4.2 Kotni zvari	31
4.3 Čelni zvari.....	32
4.4 Utrujanje.....	33
5 RAČUNSKI PRIMERI.....	34
5.1 Vijačeni spoj	34
5.2 Varjeni spoj.....	38
6 ZAKLJUČEK.....	39
VIRI	40

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Fizikalne lastnost nerjavnih jekel v primerjavi z ogljikovim jeklom S355	13
Preglednica 2:	Kemična sestava avstenitnih in duplex vijakov	20
Preglednica 3:	Nominalne vrednosti α za različne razrede vijakov	27
Preglednica 4:	Vrednosti k_s	29

KAZALO SLIK

Slika 1:	Operna hiša v Sydneyju	1
Slika 2:	The Sage, Gateshead, Združeno Kraljestvo.....	2
Slika 3:	Nerjavno jeklo	3
Slika 4:	Avstenitna mikrostruktura	4
Slika 5:	Feritna mikrostruktura	6
Slika 6:	Prikaz hitrosti širjenja korozije v mm/leto v odvisnosti od vsebnosti kroma v %	8
Slika 7:	Vsebnost legirnih elementov po družini nerjavnih jekel	10
Slika 8:	Napetostno-deformacijske krivulje različnih nerjavnih jekel in ogljikovega jekla S355; graf pri deformacijah do 0,75 % (levo) in graf do porušitve (desno)	10
Slika 9:	Tipična napetostno-deformacijska krivulja nerjavnega jekla z definicijami ključnih materialnih parametrov	12
Slika 10:	Primer galvanske korozije spoja iz vijakov iz ogljikovega jekla in elementa iz nerjavnega jekla	15
Slika 11:	Primer zaščite vijačenega spoja	15
Slika 12:	Detajl vijačenega spoja med pločevino iz ogljikovega jekla in pločevino iz nerjavnega jekla.....	19
Slika 13:	Oznaka vijaka po EN ISO 3506.....	20
Slika 14:	Simboli za definiranje pozicije lukenj	22
Slika 15:	Geometrijski pogoji pri kotnih zvarih.....	31
Slika 16:	Zasnova vijačenega spoja	34
Slika 17:	Robne oddaljenosti in razmaki med luknjami	35
Slika 18:	Zvar vozliščne pločevine na steber (levo) in vozliščna pločevina (desno).....	38

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Nerjavna jekla spadajo v družino korozijsko in toplotno odpornih jekel, ki vsebujejo najmanj 10,5% kroma. Prav tako kot obstajajo različna ogljikova konstrukcijska jekla, ki izpolnjujejo različne zahteve glede trdnosti, varivosti in žilavosti, obstaja tudi širok nabor nerjavnih jekel z različnimi stopnjami odpornosti proti koroziji in trdnosti. Ta niz lastnosti nerjavnih jekel je rezultat nadzorovanega dodajanja legirnih elementov, pri čemer vsak vpliva na mehanske lastnosti in sposobnost upiranja različnim korozivnim okoljem. Pomembno je izbrati nerjavno jeklo, ki je primerno za določeno uporabo [1].

Razvoj nerjavnih jekel sega v obdobje prve svetovne vojne, kjer je angleški metalurg iskal rešitev za problem korozije strelnega orožja britanske vojske. Železu je dodal 12,8% kroma in s tem dobil kovino, ki je kazala odpornost na korozijo. Po odkritju nerjavnega jekla, je sledil hitrorastoči razvoj. Tovarne so začele proizvajati kirurška orodja in jedilni pribor iz nerjavnega jekla. Do leta 1925 so se sodi iz nerjavnega jekla, ki so vsebovali dušikovo kislino, lahko upirali koroziji. Le leto pozneje so uporabljali nerjavno železo za kirurške vsadke [2].

Nerjavno jeklo je bilo v konstrukcijske namene prvič uporabljeno v prvi polovici 19. stoletja, ko so ga uporabili v obliki fasadne obloge pri Chrysler building v New Yorku. Prav tako je nerjavno jeklo uporabljeno pri kljunastih strehah operne hiše v Sydneyu (Slika 1), Empire State building, koncertni hiši The Sage v Združenem kraljestvu, kjer je uporabljeno za strešne panele (Slika 2) in še pri mnogo drugih [4].



Slika 1: Operna hiša v Sydneyju [3]



Slika 2: The Sage, Gateshead, Združeno Kraljestvo [4]

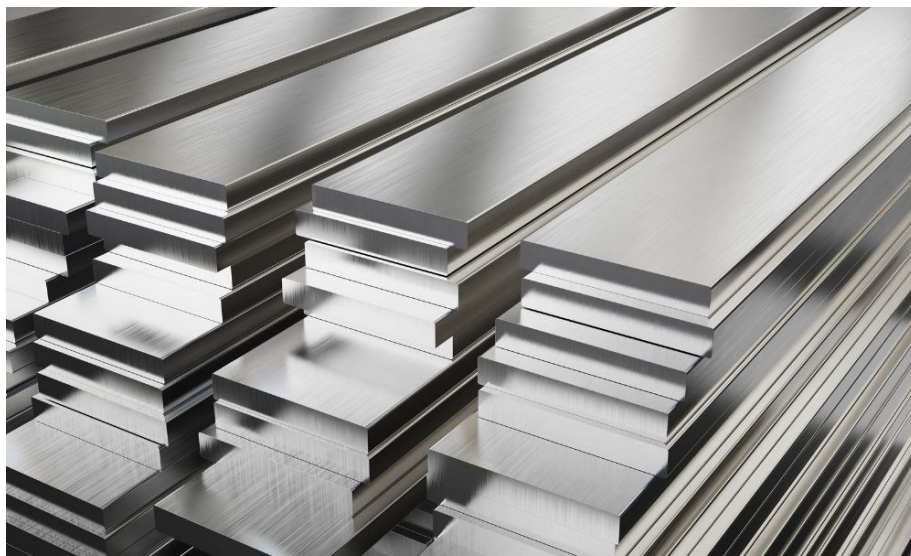
Nerjavna jekla se uporabljajo še v gospodinjstvu in v industriji ter vsepovsod kjer so jekleni elementi podvrženi korozijskemu okolju. Kasneje so se razširila tudi v živilsko in zdravstveno industrijo [5]. Danes se nerjavno jeklo čedalje več uporablja. V nalogi se osredotočam na konstrukcijsko nerjavno jeklo, ki se uporablja pri mostovih in tunelih. Pri stavbah se uporablja pri zunanjih nekonstrukcijskih elementih izpostavljenih atmosferskim vplivom, kot so fasadni in strešni paneli. Zaradi privlačnega izgleda nerjavnega jekla in ohranitve le-tega, se uporablja za vijake in ostale dele spoja. Veliko se uporablja v industrijskih konstrukcijah in še mnogo drugih [6].

Namen diplomske naloge je predstavitev pravil za dimenzioniranje spojev v konstrukcijah iz nerjavnih jekel ter primerjava oz. izpostavitve razlik v primerjavi z navadnimi ogljikovimi jekli. Do teh razlik pride zaradi drugačne oblike napetostno-deformacijske krivulje. Ogljikova jekla se do meje tečenja obnašajo linearno elastično in imajo izrazit prehod v plastično območje oz. območje utrjevanja. Nerjavna jekla pa se obnašajo nelinearno in meja tečenja ni vidno definirana. Razlike v napetostno-deformacijski krivulji so bolj pojasnjene v poglavju 2.3. Predstavljene so tudi spremembe v prihajajočem standardu prEN1993-1-4 [17]. Na koncu so podani še računski primeri.

2 NERJAVNA JEKLA

Nerjavna jekla so visoko legirana jekla, ki, kot že samo ime pove, ne rjavijo. Rjavenje je posledica korozije elementa do katere pride zaradi izpostavljenosti zunanjemu okolju. Poleg korozijske odpornosti nudijo še dobro toplotno odpornost, zmožnost popolnega recikliranja in imajo lep izgled. Slabost nerjavnih jekel je njihova cena, ki narašča s potrebo po večji korozijski odpornosti, kar je posledica višje vsebnosti legirnih elementov [6]. Tipično so nerjavna jekla 4 do 5-krat dražja od ogljikovih, obstajajo pa tudi taka, ki so tudi do 100-krat dražja od ogljikovih. En primer takšne vrste nerjavnih jekel je Inconel 600, ki spada v družino superzlitinskih avstenitnih nerjavnih jekel na osnovi niklja in kroma [7].

Glavna sestavina nerjavnih jekel je krom (Cr), ki pri vsebnostih večjih od 10,5 % in izpostavljenosti zraku ali kateremukoli drugemu oksidacijskemu okolju, na površini tvori prozoren in tanek film iz kromovih oksidov – pasivni film, debeline 2 do 3 nm. Posebnost tega filma je, da se v primeru poškodb, ob prisotnosti kisika ponovno oblikuje. Stabilnost tega filma je odvisna od sestave nerjavnega jekla, njegove površinske obdelave ter stopnje korozivnosti okolja. Stabilnost se povečuje z višjo vsebnostjo kroma in je še dodatno izboljšana z zlitinskimi dodatki molibdena, dušika, niklja, mangana, bakra, titana in ogljika.



Slika 3: Nerjavno jeklo [8]

2.1 Uporaba nerjavnih jekel v konstrukcijah

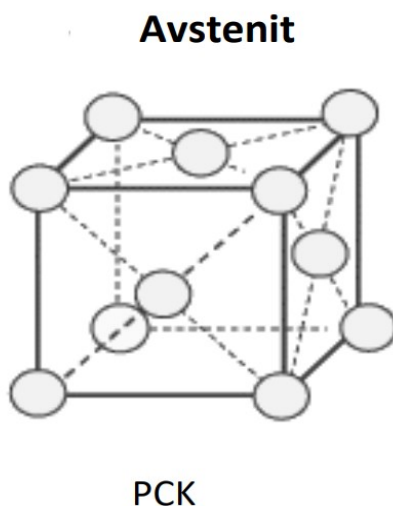
Nerjavna jekla se v gradbeništvu uporabljajo od odkritja pred približno 100 leti. Elementi iz nerjavnega jekla so vizualno privlačni in zaradi dobre korozijske odpornosti zahtevajo majhno mero vzdrževanja. Odlikuje jih dobra trdnost in žilavost, prav tako se jih lahko na koncu življenjske dobe ustrezno reciklira.

Nerjavna jekla imajo v primerjavi z navadnimi ogljikovimi jekli visoko duktilnost, kar pride še posebej do izraza na mestih kjer je potrebna seizmična odpornost zaradi dobre zmožnosti disipacije energije. V konstrukcijske namene se najpogosteje uporabljajo jekla iz vrst avstenitnih, feritnih in duplex jekel, ki so podrobneje opisana v nadaljevanju. Poleg teh poznamo še martenzitna in precipitacijsko utrjena nerjavna jekla.

Posebnosti pri dimenzioniranju konstrukcij iz nerjavnih jekel so podane v standardu SIST EN 1993-1-4 [20]. Trenutno je v pripravi nova generacija standarda, ki obstaja kot predstandard prEN [17]. Pravila za projektiranje konstrukcij iz nerjavnih jekel so bila predstavljena v diplomski nalogi V. Pučnik [25]. V tej nalogi so podrobneje predstavljena pravila za dimenzioniranje spojev v konstrukcijah iz nerjavnih jekel, ki so podana v šestem poglavju standarda SIST EN 1993-1-4 [20] in v desetem poglavju prihajajočega standarda prEN [17].

Avstenitna nerjavna jekla

Mikrostruktura avstenitnih jekel je enofazna, kjer imajo avstenitna kristalna zrna ploskovno centrirano kubično zgradbo (PCK), kar pomeni, da ima poleg osmih mrežnih točk v ogliščih kocke, še po eno mrežno točko v središču vsake plosče [10]. Na sliki 4 je predstavljena avstenitna mikrostruktura.



Slika 4: Avstenitna mikrostruktura [9]

Avstenitna nerjavna jekla predstavljajo največjo skupino nerjavnih jekel. Uporabljajo se za konstrukcije, kjer je potrebna kombinacija visoke nosilnosti, odpornosti na korozijo, možnosti oblikovanja, dobre varivosti in duktilnosti. Vse našte lastnosti so posledica avstenitne mikrostrukture. Meja tečenja avstenitnih nerjavnih jekel se giblje med 175 in 350 N/mm². Razreda 1.4301 in 1.4307 sta najpogostejše uporabljena razreda avstenitnih nerjavnih jekel. Vsebuje med 17,5 in 20% kroma in med 8 in 11% niklja. Jekla teh razredov so primerna za nizkokorozivna okolja.

Razreda 1.4401 in 1.4404 avstenitnih nerjavnih jekel sta primerna za morska in industrijska območja. Sestavlja ju 16 do 18% kroma in 10 do 14% niklja, z dodanim 2 do 3% molibdena, ki izboljša odpornost na korozijo.

Jeklo razreda 1.4571 se uporablja za varjene stike, ki zaradi nizke vsebnosti ogljika, ne vpliva negativno na korozijo v okolici zvara.

Z uporabo sodobnih tehnologij lahko izdelujemo jeklo, ki združuje lastnosti jekel 1.4301 in 1.4307 tj. dobra nosilnost jekla 1.4301 in nizka vsebnost ogljika jekla 1.4307. Pri uporabi manj sodobnih tehnologij pa moramo, če je prisotno varjenje, obvezno uporabiti jeklo z nizko vsebnostjo ogljika, da se izognemo interkristalni koroziji (podrobno opisana v poglavju 2.5.1).

Jeklo razreda 1.4318 je nizko ogljično nerjavno jeklo z visoko vsebnostjo dušika. Lahko doseže veliko nosilnost, če je hladno valjano in se pogosto uporablja v železniški industriji, primerna pa je tudi za letalske in arhitekturne namene. Ima podobno korozijsko odpornost kot jeklo 1.4301 in se uporablja v okoliščinah, kjer je potrebna višja nosilnost kot jo premore jeklo 1.4301. Ima pa višjo ceno kot 1.4301 in ni lahko dobavljivo.

Jeklo razreda 1.4420 je primer jekla z visoko vsebnostjo kroma (približno 20%) in dušika. Ima višjo nosilnost kot standardna avstenitna nerjavna jekla, okrog 390 N/mm², v primerjavi z okrog 240 N/mm² standardnih nerjavnih jekel, ob ohranjanju dobre duktilnosti.

Duplex nerjavna jekla

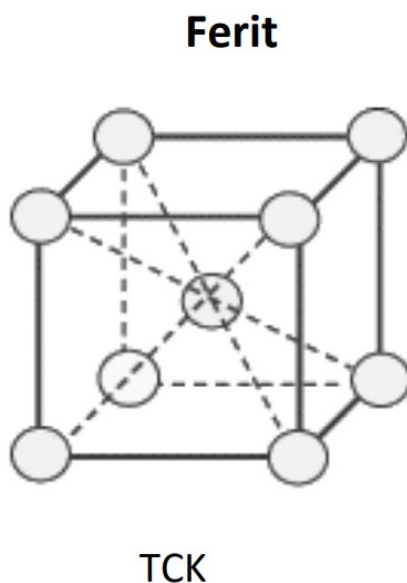
Duplex jekla imajo dvofazno mikrostrukturo iz avstenita in ferita, ki jo omogočajo legirni elementi. Ob enaki zastopanosti avstenita in ferita je žilavost materiala največja. Vsebnost kroma se giblje med 20 in 25%, vsebnost niklja pa med 1,5 in 7% [9]. Meja tečenja duplex nerjavnih jekel se giblje med 380 in 550 N/mm².

Duplex nerjavna jekla so primerna takrat, ko sta potrebni visoka nosilnost ter odpornost na jamičasto korozijo in napetostno korozijsko pokanje. Jeklo razreda 1.4462 je izjemno korozijsko odporno duplex jeklo, primerno za morska in druga agresivna okolja.

Pogostejša uporaba nerjavnih jekel za nosilno konstrukcijo je privedla do velikega povpraševanja po duplex jeklih in razvoja novih razredov duplex jekel. Posebnost novih duplex jekel je, da so nizko legirana (vsebujejo manjši delež molibdena in niklja), kar privede do bistveno nižje cene in so tako bolj ekonomična. Imajo primerljive mehanske lastnosti kot nerjavno jeklo razreda 1.4462 in korozijsko odpornost podobno standardnim avstenitnim nerjavnim jeklom. Posledično so primerna predvsem za kopenska okolja [1].

Feritna nerjavna jekla

Mikrostruktura feritnih nerjavnih jekel je enofazna, kjer imajo feritna kristalna zrna prostorsko centrirano kubično zgradbo (TCK) (slika 5), ki je enaka tisti pri ogljikovih jeklih [9]. Vsebujejo med 10,5 in 18% kroma in so brez vsebnosti niklja ali pa je ta prisoten v majhnih količinah [1]. Meja tečenja feritnih nerjavnih jekel se giblje med 200 in 300 N/mm².



Slika 5: Feritna mikrostruktura [9]

Dva standardna razreda feritnih nerjavnih jekel, ki sta primerna za konstrukcijsko uporabo in sta lahko dobavljiva, sta razred 1.4003, ki vsebuje približno 11% kroma, in razred 1.4016, ki vsebuje 16,5% kroma. Slednji ni primeren v situacijah, kjer je prisotno varjenje, saj le-to negativno vpliva na korozijsko odpornost in trdnost nerjavnega jekla.

Bolj sodobna razreda feritnih nerjavnih jekel sta 1.4509 in 1.4521, ki vsebujeta dodatna legirna elementa titan in niobij, ki izboljšata varivost in odpornost na korozijo. Jeklo 1.4521 vsebuje tudi 2% molibdena, ki pripomore k odpornosti na jamičasto korozijo in napetostno korozijsko pokanje ter odpornost v kloridnih okoljih [1].

Tipična uporaba avstenitnih in duplex jekel:

- nosilci, stebri in platforme v čistilnih napravah, kemičnih in farmacevtskih obratih...,
- pri mostovih za glavne stebre in nosilce, ograje, ovoje za kable, mostne dilatacije,
- obmorski zidovi, pomoli in druge obalne konstrukcije,
- stene odporne na ogenj in eksplozije,
- farmacevtska industrija,
- kemična oprema,
- medicinski instrumenti,
- avtomobilski deli,
- naftna in plinska industrija,
- jedrske elektrarne,
- ladjedelništvo, naftne ploščadi,
- industrija celuloze in papirja,
- rudarstvo, ...

Feritna nerjavna jekla dan danes niso pretirano v uporabi za konstrukcijske namene. Imajo potencial za uporabo tam, kjer je potrebna dobra nosilnost in dolga življenjska doba elementov s privlačnim izgledom površine.

Tipična uporaba feritnih nerjavnih jekel:

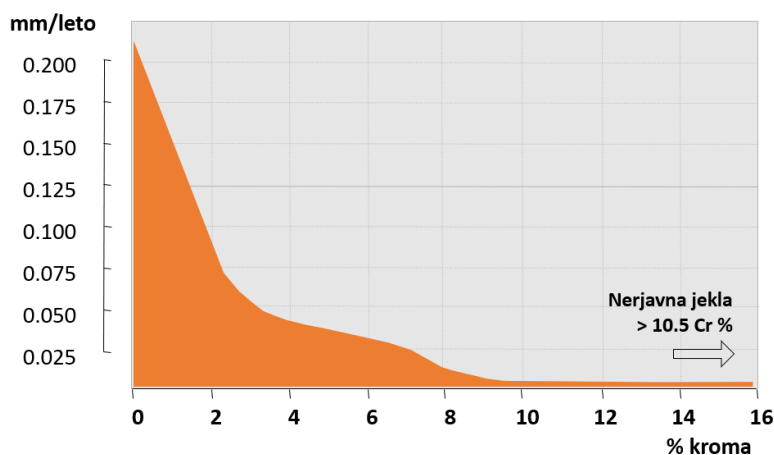
- fasade in strehe,
- vodne cevi,
- dvigala in tekoče stopnice ...

2.2 Legirni elementi

Legirni elementi so dodatki, ki jih dodajamo zlitinam jekla z namenom, da izboljšamo njihove mehanske, fizikalne in kemične lastnosti. Cena materiala narašča z višanjem vsebnosti legirnih elementov. Vsak legirni element ima svojo funkcijo in vpliv na zlitino, ki v kombinaciji z drugimi legirnimi elementi tvori več kot 150 različnih nerjavnih jekel. Ti zlitinski dodatki izboljšajo korozijo nerjavnih jekel, njihovo trdnost, obdelovalnost, varivost in druge zaželenne karakteristike.

Krom (Cr)

Krom je najpomembnejši legirni element vseh nerjavnih jekel. Odpornost na korozijo in rjavenje (oksidacija), do katerih pride pri nezaščitenih ogljikovih jeklih, je direktna posledica prisotnosti kroma. Ko zlitina vsebuje vsaj 10,5% kroma se na površini ustvari pasivni film, ki ščiti element pred korozijo. Večja je vsebnost kroma, bolj odporna je zlitina na korozijo. Slika 6 prikazuje hitrost napredovanja korozije v odvisnosti od vsebnosti kroma v zlitini [11].



Slika 6: Prikaz hitrosti širjenja korozije v mm/leto v odvisnosti od vsebnosti kroma v % (prilagojeno po [3])

Z večanjem vsebnosti kroma negativno vplivamo na oblikovalnost, varivost in možnost uporabe jekel v sistemih z različnimi toplotnimi vplivi. Vsebnost kroma se praviloma omeji na 25-30%. Korozijsko odpornost je, v primeru že velike vsebnosti kroma, boljše izboljšati z dodajanjem drugih legirnih elementov [9].

Nikelj (Ni)

Nikelj se dodaja za izboljšanje mehanskih lastnosti nerjavnega jekla, kot so trdnost, žilavost in duktilnost ter za izboljšanje odpornosti proti žveplovi kislini. Posledica prisotnosti niklja je formiranje avstenitne strukture. Izboljša tudi varivost martenzitnih nerjavnih jekel in pomaga ohranjati nizko temperaturno prevodnost. Učinkovita vsebnost niklja v zlitinah je vsaj 8%, kar je tudi najpogostejša vsebnost tega legirnega elementa v nerjavnih jeklih, ki se uporabljajo za konstrukcijske namene [5].

Molibden (Mo)

Molibden je v nerjavnih jeklih običajno prisoten v količinah 2-4%. V kombinaciji s kromom in nikljem še dodatno poveča odpornost na jamičasto korozijo in pomaga stabilizirati pasivni film v agresivnih okoljih, kot so prisotnost kislin in kloridov.

Mangan (Mn)

Mangan izboljša trdnost in toplotno obdelavo nerjavnega jekla ter zagotavlja odpornost proti jamičasti koroziji (poškoduje površino elementa, največkrat zaradi prisotnosti kloridov). Je tudi stabilizator avstenita, v večjih dozah je lahko nadomestilo za nikelj.

Ogljik (C)

Ogljik je element, ki v kombinaciji z železom tvori jeklo. Naloga ogljika je zvišanje trdote jekla in trdnost pri visokih temperaturah. Ogljik je v nerjavnih konstrukcijskih jeklih prisoten v količinah med 0,025 do 0,08 % v ogljikovih pa med 0,25 do 1,25 % [12]. Ogljik je v nerjavnih jeklih prisoten v manjših količinah, ker ima lahko negativni učinek na korozijsko odpornost zaradi tvorbe kromovih karbidov, ki negativno vplivajo na korozijsko odpornost nerjavnega jekla [13].

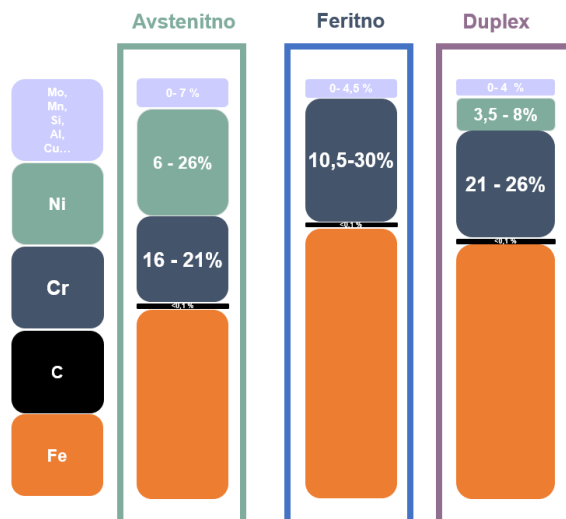
Dušik (N)

Dušik je učinkovit pri preprečevanju jamičaste in medzrnave korozije v duplex in avstenitnih jeklih. Vpliva na žilavost, trdnost in odpornost na korozijo. Je pa pomembno, da je dušik prisoten le v majhnih količinah, saj z naraščanjem negativno vpliva na mehanske lastnosti hladno valjanih elementov in povzroča krhkost v okolici zvara.

Titan (Ti)

Titan se dodaja za stabilizacijo ogljika, saj se veže z ogljikom in tvori titanove karbide. S tem prepreči vezavo ogljika s kromom, kar bi lahko negativno vplivalo na oblikovanje pasivne plasti. Poleg tega titan izboljša tudi odpornost proti jamičasti koroziji. Uporablja se ga predvsem, ko je potrebno varjenje. Zaradi možnosti proizvodnje dobro varivnih nizkoogljiknih nerjavnih jekel, se ga zaradi visoke cene uporablja manj.

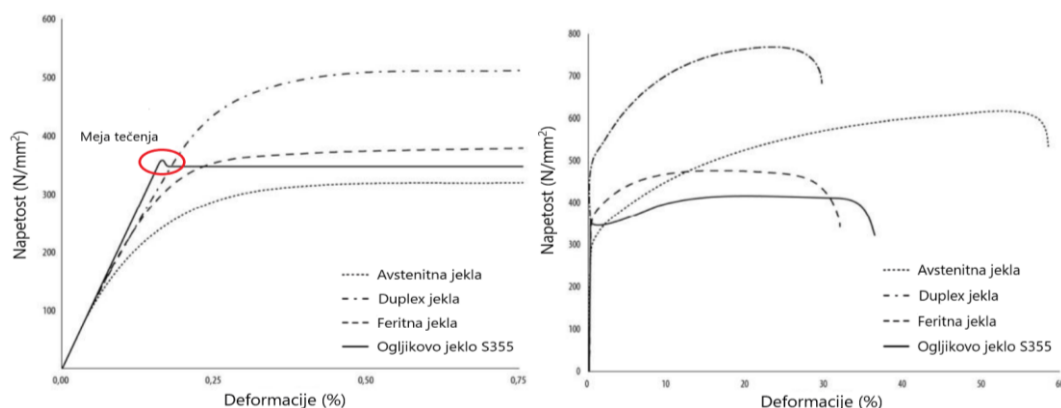
Na sliki 5 je predstavljena vsebnost posameznih legirnih elementov glede na maso za avstenitno, feritno in duplex nerjavno jeklo.



Slika 7: Vsebnost legirnih elementov po družini nerjavnih jekel [14]

2.3 Napetostno-deformacijska krivulja nerjavnih jekel

Napetostno-deformacijska krivulja nerjavnih jekel se razlikuje od krivulje ogljikovih jekel v številnih pogledih. Najpomembnejša razlika je v obliki krivulje. Ogljikova jekla se, ko se približujejo meji tečenja, obnašajo linearno in imajo izrazito mejo prehoda v plastično območje. Medtem ko se nerjavna jekla obnašajo bolj duktilno oz. napetostno-deformacijska krivulja je nelinearna in meja tečenja ni vidno definirana. Ker prehod v plastično območje ni izrazit, se za mejo tečenja uporabi napetost pri 0,2% nepovratne plastične deformacije. Na sliki 8 so predstavljene napetostno deformacijske krivulje značilnih nerjavnih jekel v primerjavi z ogljikovim jeklom S355.



Slika 8: Napetostno-deformacijske krivulje različnih nerjavnih jekel in ogljikovega jekla S355; graf pri deformacijah do 0,75 % (levo) in graf do porušitve (desno)(prilagojeno po [14])

Oblika napetostno-deformacijske krivulje vpliva na izbiro materialnega modela. Izrazito nelinearno obnašanje materiala najbolje opiše Ramberg-Osgoodov materialni model. Ta je poenostavljen tako, da

zajema le tri parametre in sicer E , $\sigma_{0,2}$ ter koeficient n , ki zajema ukrivljenost materialne krivulje. Ramberg-Osgoodov materialni model zapišemo v obliki:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n$$

Kjer je E elastični modul jekla, katerega priporočena vrednost je 200 000 MPa in se ga izračuna kot razmerje med napetostjo in deformacijo na linearnem dela krivulje, napetost $\sigma_{0,2}$ je napetost pri 0,2% deformacije. Standard SIST EN 1993-1-4 [20] podaja vrednosti koeficienta n za vsak razred nerjavnega jekla in se ga izračuna kot:

$$n = \frac{\ln 20}{\ln \left(\frac{f_y}{R_{p0,01}} \right)}$$

V naslednji generaciji standarda prEN 1993-1-4 [17] se bo koeficient n izračunal po enačbi:

$$n = \frac{\ln 4}{\ln \left(\frac{f_y}{R_{p0,05}} \right)}$$

Kjer je:

$R_{p0,05}$... Napetost pri 0,05% deformaciji

f_y ... Napetost na meji tečenja

Na sliki 9 so predstavljeni ključni materialni parametri na tipični napetostno-deformacijski krivulji nerjavnega jekla. Standard podaja tudi zvezo med napetostmi in deformacijami, ki temelji na spremenjenem Ramberg-Osgoodovem materialnem modelu:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n, & \sigma \leq f_y \\ 0,002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right)^m, & f_y \leq \sigma \leq f_u \end{cases}$$

Trenutni standard SIST EN 1993-1-4 podaja enačbo za izračun koeficienta m , ki upošteva prirast nosilnosti zaradi utrjevanja, in se izračuna kot:

$$m = 1 + 3,5 \frac{f_y}{f_u}$$

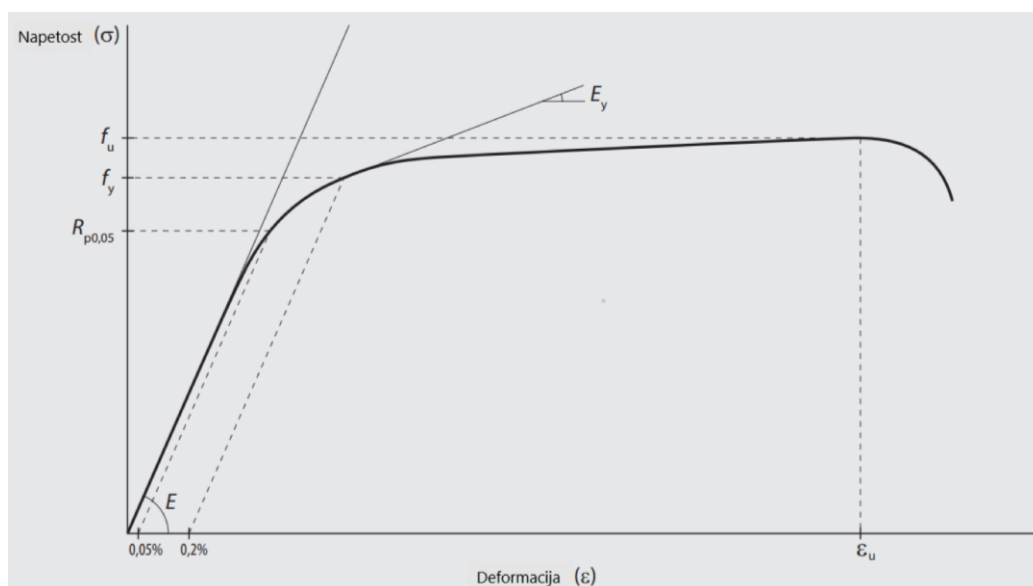
V novi generaciji standarda SIST EN 1993-1-4 se bo koeficient m izračunal po enačbi:

$$m = 1 + 2,8 \frac{f_y}{f_u}$$

Kjer je:

f_u ... Natezna trdnost jekla

f_y ... Napetost na meji tečenja



Slika 9: Tipična napetostno-deformacijska krivulja nerjavnega jekla z definicijami ključnih materialnih parametrov (prilagojeno po [1])

$E_{0,2}$ (E_y) je tangentni modul elastičnosti pri meji tečenja in se ga izračuna po naslednji formuli z upoštevanjem modula elastičnosti 200 000 MPa in se uporablja za vsa nerjavna jekla:

$$E_y = \frac{E}{1 + 0,002 \cdot n \cdot \frac{E}{f_y}}$$

Mehanske lastnosti nerjavnega jekla so odvisne od njegove mikrostrukture in načina obdelave. Višja trdnost je povezana z višjo vsebnostjo ogljika (C) in dušika (N).

Trdnost nerjavnih jekel lahko izboljšamo s hladno obdelavo, kar velja predvsem za avstenitna jekla. S hladno obdelavo povečamo trdnost, ampak zmanjšamo duktilnost, kar je majhnega pomena zaradi visoke začetne duktilnosti. Nerjavna jekla so boljša tudi pri udarnih obremenitvah, še posebej jekla iz razreda avstenitnih jekel, kar je posledica dobre žilavosti in duktilnosti ter utrjevanja.

2.4 Fizikalne lastnosti nerjavnega jekla

Pomembne karakteristike nerjavnega jekla so poleg korozijske odpornosti tudi oblikovalnost, temperaturna obstojnost in trajnost. Fizikalne lastnosti posamezne skupine nerjavnih jekel v primerjavi z ogljikovim jeklom S355 so predstavljene v preglednici 1.

Preglednica 1: Fizikalne lastnosti nerjavnih jekel v primerjavi z ogljikovim jeklom S355 [1].

	Gostota [kg/m^3]	Koeficient toplotnega raztezka [$10^{-6}/^\circ\text{C}$]	Toplotna prevodnost [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]	Toplotna kapaciteta [$\text{J/kg}^\circ\text{C}$]
Avstenitna	7900–8000	16–16,5	15	500
Feritna	7700–7850	10–12	21–25	430–460
Duplex	7700–7800	13	13–15	480–500
Ogljikovo jeklo S355	7850	12	53	440

Toplotna prevodnost in deformabilnost pri povišani temperaturi sta ključna parametra pri zagotavljanju požarne odpornosti konstrukcije. Kot je razvidno iz preglednice je koeficient toplotnega raztezka, ki določa stopnjo deformabilnosti, v primerjavi z ogljikovimi jekli dokaj podoben. Do večjih razlik pride pri toplotni prevodnosti, kjer imajo nerjavna jekla celo do trikrat manjšo toplotno prevodnost. Do razlik v termičnih lastnosti nerjavnih jekel od običajnih ogljikovih jekel pride zaradi razlik v mikrostrukturi in vplivu legirnih elementov.

2.5 Korozija nerjavnih jekel

Nerjavno jeklo je v splošnem dobro korozijsko odporno in se bo dobro odrezalo v večini okolij. Pomembno je izbrati primeren razred nerjavnega jekla glede na namen uporabe posameznih elementov. V splošnem velja, da večja potreba po korozijski odpornosti privede do višje cene zaradi večje količine dodanih legirnih elementov.

Pogosti razlogi zaradi katerih pride do neustrezne odpornosti nerjavnih jekel proti koroziiji:

- nepravilna ocena okolja pri izbiri nerjavnega jekla ali izpostavljenost nepričakovanim vplivom,

- neprimerna izbira tehnologije dela z nerjavnim jeklom (npr. varjenje, segrevanje med formiranjem,...) ter
- nepopolno odstranjen oksidni sloj pri varjenju

Tudi če se pojavi površinska korozija, je malo verjetno, da bo nosilnost elementa ogrožena. V nekaterih agresivnih okoljih so nerjavna jekla nižjega razreda korozijske odpornosti lahko dovzetna za lokalni napad.

2.5.1 Oblike korozije nerjavnih jekel

Jamičasta korozija

Kot ime namiguje, se jamičasta korozija pojavi v obliki lokalnih jamic. Vzrok za njen nastanek je lokalno poškodovanje pasivnega filma, tipično zaradi kloridnih ionov. V večini konstrukcijskih elementov ta korozija prizadene le površino elementov, zato je redukcija samega prereza zaradi korozije zanemarljiva. Ker je glavni vzrok za nastanek jamičaste korozije prisotnost kloridnih ionov, je tveganje za to korozijo največje ob slani vodi in okoljih kjer je prisotna sol (npr. ob cestah).

Odpornost nerjavnih jekel na jamičasto korozijo je odvisno od njihove kemične sestave. Prisotnost kroma, molibdena in dušika povečuje odpornost proti jamičasti koroziji.

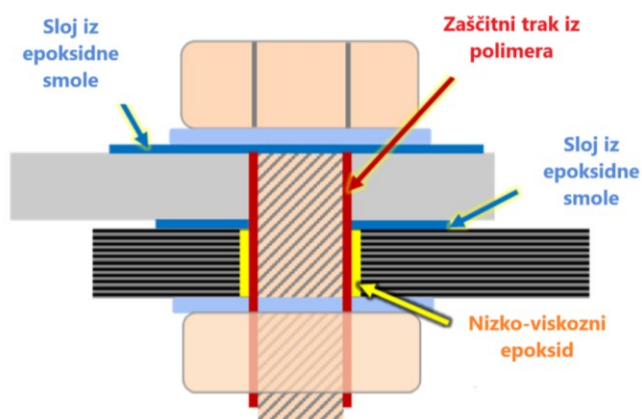
Bimetalčna (galvanska) korozija

Do te vrste korozije pride, ko sta dve kovini z različnim elektrodnim potencialom v kontaktu s tekočino, ki prevaja električni tok (npr. slana voda ali umazana sladka voda) oz. elektrolitom. Na lastnosti elektrolita vpliva kemijska sestava, pH, električna prevodnost. V galvanskem paru se ustvarita katoda (kovina z višjim potencialom) in anoda (kovina z nižjim potencialom), kjer tok teče iz anode proti katodi preko elektrolita in spreminja potencial le-teh. Anoda postaja vedno bolj elektro pozitivna, medtem ko katoda postaja vedno bolj elektro negativna [22]. Nerjavno jeklo običajno tvori katodo v galvanskem paru zato ni dovzetno za to vrsto korozije. Problematični so spoji, ko želimo povezati nerjavno jeklo z aluminijem ali ogljikovim jeklom, kjer slednja tvorita anodo in sta zato podvržena visoki stopnji korozije. Na agresivnost galvanske korozije vplivata tudi temperatura in površina katode in anode. Pri spojih, kjer je element iz nerjavnega jekla povezan preko vijakov iz ogljikovega jekla, je zaradi razlike v površini posameznih kovin, korozija na vijake veliko bolj agresivna. Ta situacija je prikazana na sliki 10.



Slika 10: Primer galvanske korozije spoja iz vijakov iz ogljikovega jekla in elementa iz nerjavnega jekla [23]

Pomembno je, da imajo vsi elementi v stiku enako korozijsko odpornost oz. enak elektrodni potencial. Galvansko korozijo pri spojih lahko preprečimo tako, da eliminiramo pretok električnega toka. To lahko storimo tako, da izoliramo stik med kovinama z neprevodno plastiko, gumo, teflonom, materiali iz polimera in/ali barvanjem. Na sliki 11 je prikazan primer zaščite vijačenega spoja.



Slika 11: Primer zaščite vijačenega spoja [24]

Medzrnava (intekristalna) korozija

Do te vrste korozije pride predvsem pri avstenitnih nerjavnih jeklih. Podvrženost cikličnemu segrevanju med 450 °C in 850 °C in ohlajanju do katerega pride med varjenjem, povzroči izločanje kromovih karbidov, kar znižuje vsebnost kroma v jeklu in s tem korozijsko odpornost elementa. Medzrnavi koroziji se lahko izognemo z uporabo nizkoogljičnih nerjavnih jekel ali z dodajanjem legirnih elementov

kot sta titan in niobij, katera služita kot stabilizatorja zaradi njunega vezanja z ogljikom in s tem preprečujeta vezanje kroma z ogljikom.

Napetostno korozijsko pokanje nerjavnih jekel

Do napetostno korozijskega pokanja pride pri kombinaciji povečanih nateznih napetosti in prisotnost kloridnih raztopin (morske konstrukcije, bazeni,...). Pojavijo se prelomi transkristalne ali interkristalne narave. Nevarnost nastopa te korozije se veča z naraščanjem temperature. Do korozijskega pokanja pride v glavnem pri avstenitnih jeklih, katerim se za to dodaja nikelj.

Režna korozija

Do režne korozije pride v ozkih režah, ki niso zatesnjene in poteka stalni tok vode v reži in izven nje. Reža mora biti zadosti majhna, da lahko v njo pride voda in z njo raztopljeni kloridi, kisik pa ne. To pomanjkanje kisika preprečuje formiranje pasivnega filma in s tem zmanjša odpornost na korozijo. Ta oblika korozije je še posebej nevarna pri elementih, ki so v celoti potopljeni saj je prisotnost kisika potrebnega za formiranje pasivnega filma omejena.

2.5.2 Korozija v določenih okoljih

Morska voda

Morska voda vsebuje veliko količino kloridnih ionov in je zato zelo korozivna. Pri elementih, ki so podvrženi stalnemu namakanju zaradi nihanja vodne gladine ali špricanja vode, so posledice korozije še hujše kot pri stalno potopljenih elementih. V takih primerih namreč pride do izhlapevanja, ki povzroča kopičenje kloridov na površini materiala. Vpliv morske vode se kaže tudi v prisotnosti organizmov, ki tvorijo sulfidna okolja.

Zrak

Atmosfersko okolje ima različne vplive na korozijo nerjavnih jekel. Najpogostejši vzroki za atmosfersko korozijo so: prisotnost kloridov na obalnih območjih, soli proti zmrzali in kemikalije (klorovodikova kislina). Delci prahu in peska na površini nerjavnega jekla povzročijo razpoke v katerih se zadržujejo soli, kemikalije in šibka kislina kislega dežja, kar povečuje možnost korozije.

Kemikalije

Nerjavna jekla so odporna na veliko število kemikalij in se jih večkrat uporablja za zadrževanje kemikalij. Odpornost nerjavnega jekla na korozijo je odvisno od oksidacijske sposobnosti kisline, legirnih elementov in toplotne obdelave jekla. Nerjavnih jekel ne uporabljamo ob prisotnosti klorovodikove kisline zaradi občutljivosti zlitin na napetostno in jamičasto korozijo, ki jo povzroči kislina.

3 VIJAČENI SPOJI V KONSTRUKCIJAH IZ NERJAVNIH JEKEL

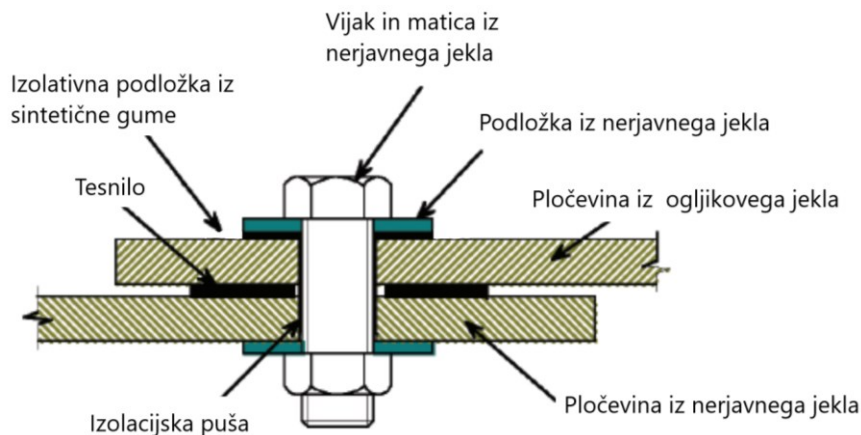
To poglavje je povzeto po Priročniku za projektiranje konstrukcij iz nerjavnih jekel (ang. »Design manual for Structural Stainless Steel«) [1] ter standardih SIST EN 1993-1-4 [20] in prEN1993-1-4 [17].

3.1 Splošno

Pri dimenzioniranju spojev je potrebno zagotoviti ustrezno korozijsko odpornost. To je še posebej pomembno za spoje, ki so izpostavljeni vlagi zaradi vremena, kondenzaciji, potopitvi ali špricanju. Če je možno, je priporočljivo, da se spoji v celoti omejijo od virov navlaževanja. V primeru kondenzacije lahko suhost zagotovimo s primernim ventiliranjem ali poskrbimo, da je temperatura v okolici spoja višja od temperature rosišča.

Kjer se ni mogoče izogniti spoju, kjer sta kombinirana ogljikovo in nerjavno jeklo, je potrebno z dodatnimi ukrepi preprečiti galvansko korozijo. Uporabi vijakov iz ogljikovih jekel v kombinaciji z elementi iz nerjavnega jekla se je potrebno vedno izogibati. Pomembno je, da vijaçene spoje iz ogljikovih in nerjavnih jekel, ki bi bili podvrženi nesprejemljivi stopnji korozije, izoliramo. To lahko storimo tako, da preprečimo prehod električnega toka z vgradnjo izolacijskih podložk, tesnil in puš iz polimernega materiala ali pa premažemo en ali oba elementa s cinkom.

Izolacijske podložke so iz sintetične gume (neopren), ki je dovolj fleksibilna, da pod pritiskom dobro zatesni stik in ima dolgo življenjsko dobo, da ohrani izolacijo med kovinama. Pri vgradnji podložk iz sintetične gume je pomembno, da ne presegajo velikosti podložk iz nerjavnega jekla, kajti to lahko negativno vpliva na odpornost spoja proti jamičasti koroziji. Dodatna načina zaščite pred jamičasto korozijo sta vgradnja podložke tik pod glavo vijaka in zatesnitev celotne površine s silikonskim tesnilom. Primer spoja z vgrajenimi izolacijskimi podložkami je prikazan na sliki 12.



Slika 12: Detajl vijachenega spoja med pločevino iz ogljikovega jekla in pločevino iz nerjavnega jekla

[15]

V primeru varjenih spojev, ki so iz ogljikovih in nerjavnih jekel, je priporočeno, da se poslužimo sistema premazov. Pri premazih za korozijsko zaščito ogljikovih jekel je pomembno, da se jih nanese v okolici zvara tudi na nerjavno jeklo do razdalje 75 mm.

3.2 Vijaki

Korozijska odpornost veznih sredstev mora biti enaka ali boljša od korozijske odpornosti materiala katerega priključuje. v konstrukcijah iz nerjavečega jekla Ni priporočljivo uporabljati vijakov iz ogljikovega jekla, ker so taki spoji še posebej dovzetni za korozijo. Kadar je površina nerjavnega jekla v primerjavi s površino ogljikovega jekla velika, bodo vijaki podvrženi agresivni koroziji. V obratnem primeru je nevarnost korozije manjša.

Vijake iz nerjavečega jekla pokriva standard SIST EN ISO 3506 [26]. V tem standardu je material iz katerega sta izdelana vijak in matica klasificiran s črko. "A" za avstenitno, "F" feritno, "C" martenzitno in "D" duplex jeklo. Priporočeno je, da se v konstrukcijske namene uporabljajo vijaki iz avstenitnih in duplex jekel. Črki sledi številka (1, 2, 3, 4, 5, 6 in 8), kar predstavlja korozijsko odpornost; 1 predstavlja najmanjšo korozijsko odpornost, 8 pa največjo. V preglednici 2 so predstavljeni razredi avstenitnih in duplex vijakov in njihova kemična sestava:



Slika 13: Oznaka vijaka po EN ISO 3506 [27]

Preglednica 2: Kemična sestava avstenitnih in duplex vijakov [1].

Razred	Kemična sestava [%]							
		C	Mn	P	Cr	Mo	Ni	N
Avstenitni vijaki	A1	0,12	6,5	0,020	16–19	0,7	5–10	/
	A2	0,10	2,0	0,050	15–20	/	8–19	/
	A3	0,08	2,0	0,045	17–19	/	9–12	/
	A4	0,08	2,0	0,045	16–18,5	2–3	10–15	/
	A5	0,08	2,0	0,045	16–18,5	2–3	10,5–14	/
	A8	0,03	2,0	0,040	19–22	6–7	17,5–26	/
Duplex vijaki	D2	0,04	6,0	0,040	19–24	0,1–1	1,5–5,5	0,05–0,2
	D4	0,04	6,0	0,040	21–25	0,1–2	1,0–5,5	0,05–0,3
	D6	0,03	2,0	0,040	21–26	2,5–3,5	4,5–7,5	0,08–0,35
	D8	0,03	2,0	0,035	24–26	3–4,5	6–8	0,2–0,35

3.3 Prednapeti vijaki

Spoji s prednapetimi vijaki iz nerjavnih jekel se do pred kratkim niso uporabljali zaradi pomanjkanja znanja. Najnovejše raziskave spojev iz prednapetih vijakov iz nerjavnega jekla kažejo, da [28]:

- se vijake iz avstenitnih in duplex nerjavnih jekel razreda 80 in 100 lahko prednapenja, če zagotovimo primeren razred vijaka, napenjalno metodo in mazivo,
- so izgube zaradi časovnega sproščanja napetosti pri prednapetih vijakih iz nerjavnega jekla primerljive s tistimi iz ogljikovih jekel,
- so izmerjeni torni količniki po meritvah na peskani površini nerjavnih jekel zelo podobni tistim za ogljikova jekla.

3.4 Luknje za vijake

Luknje za vijake se lahko naredi z vrtanjem ali prebijanjem. Luknje narejene s prebijanjem so lahko zaradi hladne obdelave bolj dovzetne za korozijo, in so zato manj primerna v agresivnih okoljih kot so težka industrija in morsko okolje. Največji dovoljeni premeri standardnih lukenj:

- premer vijaka + 1 mm za vijake M12 in M14
- premer vijaka + 2 mm za vijake od M16 do M24
- premer vijaka + 3 mm za vijake M27 in večje

3.5 Dimenzioniranje vijačenih spojev

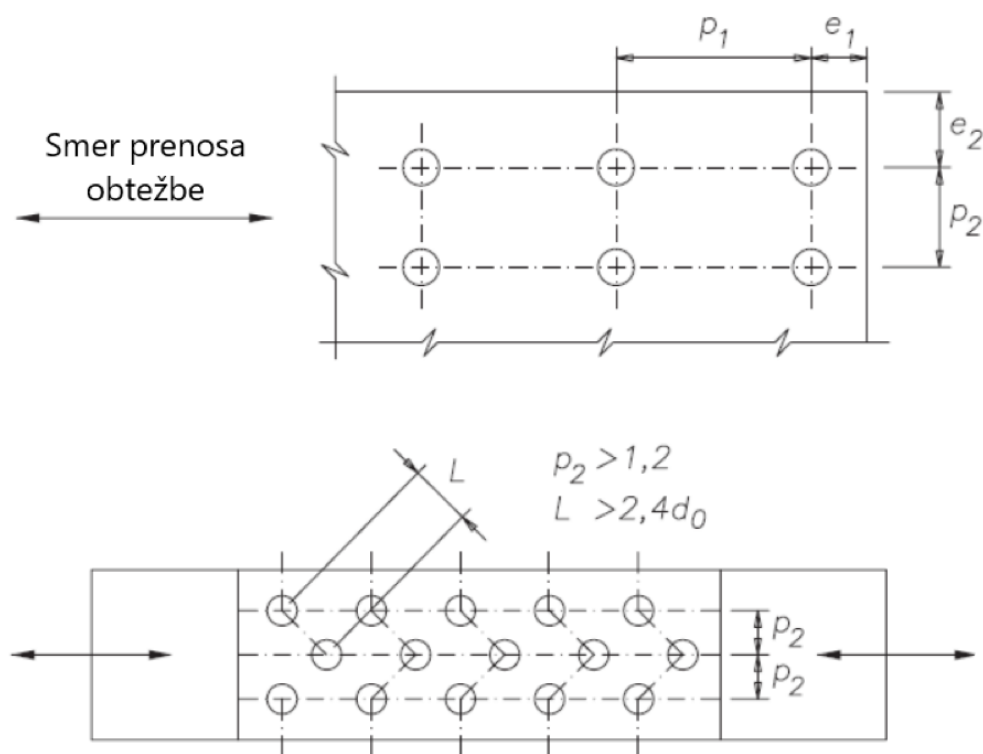
3.5.1 Pozicija lukenj

Mejne vrednosti za razdalje pri pozicijah lukenj za vijake iz nerjavnega jekla so enake kot pri ogljikovih jeklih, ki jih narekuje standard SIST EN 1993-1-8 [21].

Robna razdalja je definirana kot razdalja od središča luknje do sosednjega roba pločevine, pravokotno na smer obtežbe. Končna razdalja je definirana isto, vendar v smeri prenosa obtežbe (Slika 13). Najmanjšo vrednost končne razdalje, e_1 , ali robne razdalje, e_2 je potrebno vzeti kot $1,2d_0$, kjer je d_0 premer luknje za vijak. Upoštevati je potrebno, da je lahko končna razdalja večja od te vrednosti, da se zagotovi ustrezna nosilnost.

Največja vrednost končne ali robne razdalje naj bo omejena na $4t + 40$ mm, kjer je t debelina (v mm) tanjše zunanje pločevine. Najmanjši razmik med središči vijakov je $2,2d_0$ v smeri napetosti p_1 . Najmanjši ustrezni razmik p_2 , pravokotno na smer napetosti, je $2,4d_0$.

Največji razmik vijakov v kateri koli smeri naj bo tak, da se upošteva lokalni uklon pločevine. Za vijake v zamaknjenih vrstah se lahko uporabi minimalni razmik med vrstami $p_2 = 1,2 d_0$, če je najmanjša razdalja, L , med katerimakoli dvema vijakoma v zamaknjeni vrsti večja ali enaka $2,4d_0$. Na sliki 13 so prikazane oznake posameznih razmikov.



Slika 14: Simboli za definiranje pozicije lukenj [16]

3.5.2 Nosilnost na bočni pritisk

Standard SIST EN 1993-1-4 določa, da se za natezno trdnost f_u vzame reducirana vrednost, ki se jo določi v skladu s pravili za ogljikova jekla, ki so navedena v standardu SIST EN 1993-1-8 in se izračuna kot:

$$f_{u,red} = 0,5 f_y + 0,6 f_u$$

Kjer je:

f_y ... napetost na meji tečenja

f_u ... natezna trdnost nerjavnega jekla

V naslednji generaciji standarda SIST EN 1993-1-4 bo to določilo izvzeto, saj je ta določitev natezne trdnosti, ki izhaja iz pravil za dimenzioniranje spojev iz ogljikovih jekel, preveč konservativna.

Predstandard prEN 1993-1-4:2021 določa, da se projektna nosilnost s iz nerjavnega jekla na bočni pritisk $F_{b,Rd}$ lahko izračuna na podlagi kriterija nosilnosti ali na podlagi kriterija deformacij. Kriterij nosilnosti se lahko uporabi, če deformacija luknje za vijaka zaradi obtežbe po mejnem stanju uporabnosti-MSU ni

ključnega pomena. Nosilnost na bočni pritisk posameznega vijaka iz nerjavnega jekla se izračuna po enačbi:

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot t \cdot d}{\gamma_{M2}}$$

Kjer je:

- α_b ... koeficient nosilnosti na bočni pritisk v smeri delovanje obtežbe
- k_1 ... koeficient nosilnosti na bočni pritisk pravokotno na smer delovanje obtežbe
- f_u ... natezna trdnost priključne pločevine
- t ... debelina priključne pločevine
- d ... premer vijaka
- γ_{M2} ... delni faktor odpornosti

Predstandard prEN 1993-1-4:2021 deli vijačene spoje iz nerjavnih jekel v dve skupini glede na debelino priključne pločevine (pločevine z debelino $t > 4$ mm in $t < 4$ mm). Do razlik v primerjavi z ogljikovimi jekli pride pri določitvi koeficientov nosilnosti α_b in k_1 .

3.5.2.1 Koeficienti nosilnosti na bočni pritisk pri spoju s priključno pločevino debeline $t > 4$ mm

Pri spojih iz debele priključne pločevine po kriteriju nosilnosti koeficient α_b izračunamo kot:

Za robni vijak:

$$\alpha_b = \min \left\{ 2,5, \frac{5e_1}{6d_0} \right\}$$

Za notranji vijak:

$$\alpha_b = \min \left\{ 2,5, \frac{5p_1}{12d_0} \right\}$$

Koeficient k_1 pa izračunamo kot:

Za robni vijak:

$$k_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{če } \min\left(\frac{e_2}{d_0}, \frac{p_2}{2d_0}\right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{če } \min\left(\frac{e_2}{d_0}, \frac{p_2}{2d_0}\right) \leq 1,5 \end{cases}$$

Za notranji vijak:

$$k_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{če } \left(\frac{p_2}{2d_0}\right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{če } \left(\frac{p_2}{2d_0}\right) \leq 1,5 \end{cases}$$

Pri spojih iz debele priključne pločevine je po kriteriju deformacij koeficient $k_1 = 0,5$ za notranji in robni vijak, koeficient α_b pa izračunamo po enačbi:

Za robni vijak:

$$\alpha_b = \min\left\{2,5, \frac{5e_1}{4d_0}\right\}$$

Za notranji vijak:

$$\alpha_b = \min\left\{2,5, \frac{5p_1}{8d_0}\right\}$$

3.5.2.2 Koeficienti nosilnosti na bočni pritisk pri spoju s priključno pločevino debeline $t < 4$ mm

Pri spojih iz tanke priključne pločevine po kriteriju nosilnosti koeficient α_b za notranjo pločevino v spojih z dvema strižnima ravninama izračunamo kot:

Za robni vijak:

$$\alpha_b = \min\left\{2,5, \frac{5e_1}{6d_0}\right\}$$

Za notranji vijak:

$$\alpha_b = \min \left\{ 2,5, \frac{5p_1}{12d_0} \right\}$$

Koeficient k_1 pa izračunamo kot:

Za robni vijak:

$$k_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{če } \min \left(\frac{e_2}{d_0}, \frac{p_2}{2d_0} \right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{če } \min \left(\frac{e_2}{d_0}, \frac{p_2}{2d_0} \right) \leq 1,5 \end{cases}$$

Za notranji vijak:

$$k_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{če } \left(\frac{p_2}{2d_0} \right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{če } \left(\frac{p_2}{2d_0} \right) \leq 1,5 \end{cases}$$

Pri spojih iz tanke priključne pločevine po kriteriju nosilnosti je koeficient k_1 za spoje z eno strižno ravnino in zunanjo pločevino spoja z dvema strižnima ravninama enak $k_1 = 0,64$ za notranji in robni vijak, koeficient α_b pa izračunamo po enačbi:

Za robni vijak:

$$\alpha_b = \min \left\{ 2,5, \frac{5e_1}{4d_0} \right\}$$

Za notranji vijak

$$\alpha_b = \min \left\{ 2,5, \frac{5p_1}{8d_0} \right\}$$

Pri spojih iz tanke priključne pločevine je po kriteriju deformacij, koeficient $k_1 = 0,5$, koeficient α_b pa izračunamo po enačbi:

Za robni vijak:

$$\alpha_b = \min \left\{ 2,5, \frac{5e_1}{4d_0} \right\}$$

Za notranji vijak:

$$\alpha_b = \min \left\{ 2,5, \frac{5p_1}{8d_0} \right\}$$

Nosilnost na bočni pritisk skupine vijakov lahko določimo kot vsoto nosilnosti na bočni pritisk $F_{b,Rd}$ posameznega vijaka, če je strižna nosilnost $F_{v,Rd}$ vsakega vijaka večja ali enaka nosilnosti na bočni pritisk posameznega vijaka $F_{b,Rd}$. Če to ne drži, se odpornost skupine vijakov izračuna tako, da se vzame vijak, ki ima najmanjšo nosilnost na bočni pritisk in se pomnoži s številom vijakov.

3.5.3 Natezna nosilnost vijakov

Natezno nosilnost vijaka iz nerjavnega jekla $F_{t,Rd}$ izračunamo po enačbi:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

Kjer je:

$k_2 = 0,63$ za vijake z ugreznjeno glavo, sicer pa velja $k_2 = 1,0$

f_{ub} ... natezna trdnost vijaka

A_s ... neto prerez vijaka

γ_{M2} ... delni faktor odpornosti

Enačba za izračun natezne nosilnosti vijaka iz nerjavnega jekla je v glavnem enaka tisti za vijake iz ogljikovega jekla po EN 1993-1-8. Do spremembe pride pri koeficientu k_2 , ki je pri ogljikovih jeklih za navadne vijake enak 0,9, po predstandardu prEN 1993-1-4 pa je ta vrednost za vijake iz nerjavnega jekla enaka 1,0.

3.5.4 Strižna nosilnost vijakov

Strižna nosilnost vijaka iz nerjavnega jekla $F_{v,Rd}$ je odvisna od števila strižnih ravnin. Za vsako strižno ravnino se, ob odsotnosti natezne sile, strižna nosilnost vijaka izračuna kot:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$$

Kjer je:

f_{ub} ... natezna trdnost vijaka

A ... površina prereza vijaka

γ_{M2} ... delni faktor odpornosti

Površina prereza vijaka "A" je odvisna od tega ali strižna ravnina poteka skozi navoje (A_s) ali preko stebila (A).

Enačba za račun strižne nosilnosti vijaka iz nerjavnega jekla je enaka tisti za ogljikovega jekla, ki je podana v SIST EN 1993-1-8. Do razlike pride pri določitvi koeficienta α , ki se v zdajšnji verziji standarda SIST EN 1993-1-4 vzame kot 0,5 vedno, kadar poteka strižna ravnina skozi navoj (neodvisno od kvalitete vijaka) ter 0,6, kadar poteka strižna ravnina preko stebila vijaka. V predstandardu prEN 1993-1-4 pa pride do sprememb pri določitvi koeficienta α , le-ta namreč podaja vrednosti še bolj natančno, in sicer posebej za vijake iz avstenitnih in duplex nerjavnih jekel. Nominalne vrednosti koeficienta α iz predstandarda so predstavljene v preglednici 3 in so neodvisne od tega kje v vijaku poteka strižna ravnina (preko navojev ali preko stebila vijaka). Kot je razvidno iz tabele, so vrednosti koeficienta α v vseh primerih enake ali večje kot pri vijakih iz navadnih jekel, kjer je koeficient enak 0,5 ali 0,6.

Preglednica 3: Nominalne vrednosti α za različne razrede vijakov [17].

Razred vijaka	Avstenitni	Duplex
50	0,8	/
70	0,7	0,8
80	0,7	0,7
100	0,6	0,6

3.5.5 Natezna in strižna nosilnost vijakov

V primeru, ko je vijak obremenjen hkrati s strižno in natezno silo, moramo upoštevati interakcijo. To naredimo tako, da izpolnimo naslednja kriterija:

- Če strižna ravnina poteka skozi navoje:

$$\left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^{1.7} + \left(\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}}\right)^{1.7} \leq 1,0, \quad \text{ampak } \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

- Če strižna ravnina poteka skozi steblo vijaka:

$$\left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^{1.7} + \left(\frac{F_{t,Ed}}{1,25F_{t,Rd}}\right)^{1.7} \leq 1,0, \quad \text{ampak } \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

Podani enačbi sta del predstandarda prEN 1993-1-4, ki trenutno še ni v veljavi in bosta veljali v naslednji izdaji standarda. Trenutni standard SIST EN 1993-1-4 ne podaja posebnega kriterija za kontrolo interakcije, kar pomeni, da velja kontrola po standardu za ogljikova jekla SIST EN 1993-1-8.

3.5.6 Torna nosilnost

Pravila za določanje projektne torne nosilnosti spoja s prednapetimi vijaki iz nerjavnega jekla so enaka kot pri ogljikovih jeklih (standard SIST EN 1993-1-8). Torna nosilnost enega vijaka se izračuna kot:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,C} \quad \text{za MSN – Mejno stanje nosilnosti}$$

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3,ser}} \cdot F_{p,C} \quad \text{za MSU – Mejno stanje uporabnosti}$$

Kjer so:

k_s ... koeficient, ki zajema vpliv velikosti in oblike lukenj, glej preglednico 4

n ... število strižnih ravnin

γ_{M3} ... delni faktor torne nosilnosti v mejnem stanju nosilnosti

$\gamma_{M3,ser}$... delni faktor torne nosilnosti v mejnem stanju uporabnosti

$F_{p,C}$... sila prednapenjanja; izračuna se kot $F_{p,C} = 0,7 f_{yb} A_s$

μ ... torni količnik. Določi se s testi skladno s SIST EN 1090-2. Za nekatere primere so vrednosti, podane v tabeli 10.4 standarda prEN 1993-1-4 [17].

Do razlik pride pri določitvi sile prednapenjanja in pri vrednostih tornih količnikov. Predstandard prEN1993-1-4 za izračun sile prednapenjanja uporabi napetost pri meji tečenja vijaka. Med tem, ko standard SIST EN 1993-1-8, ki velja za ogljikova jekla in po katerem se ravna trenutni standard SIST EN 1993-1-4, vzame natezno trdnost vijaka. Do razlik v vrednostih tornih količnikov pride v razredu torne površine C in D. Trenutni standard SIST EN 1993-1-4, ki povzema vrednosti iz standarda, ki velja

za ogljikova jekla, vzame te vrednosti nekoliko večje, in sicer 0,3 za C razred in 0,2 za D razred. V predstandardu prEN 1993-1-4 se vrednost za C razred vzame 0,2, za razred D pa 0,15.

Preglednica 4: Vrednosti k_s [18].

Opis	k_s
Vijaki v običajnih luknjah.	1,0
Vijaki v povečanih ali kratkih podaljšanih luknjah z vzdolžno osjo luknje pravokotno na smer delovanja obtežbe.	0,85
Vijaki v dolgih podaljšanih luknjah z vzdolžno osjo luknje pravokotno na smer delovanja obtežbe.	0,7
Vijaki v kratkih podaljšanih luknjah z vzdolžno osjo luknje vzporedno smeri delovanja obtežbe.	0,76
Vijaki v dolgih podaljšanih luknjah z vzdolžno osjo luknje vzporedno smeri delovanja obtežbe.	0,63

4 VARJENI SPOJI V KONSTRUKCIJAH IZ NERJAVNIH JEKEL

4.1 Splošno

Med varjenjem nerjavnega jekla pride do poškodbe pasivnega filma, kar za zvar in njegovo okolico pomeni dovzetnost za korozijo. Po varjenju je potrebno vare očistiti oksidacije, da se lahko ponovno ustvari pasivni film iz kromovega oksida. Temu procesu pravimo pasivacija. V primeru, da so vari srebrni ali rahlo zlate barve naknadno čiščenje ni potrebno. Vare se lahko očisti z raznimi krtačami, kislinami ali aparati za elektro-kemično čiščenje varov [19].

Izmenično segrevanje in ohlajanje, do katerega pride pri varjenju, vpliva na mikrostrukturo vseh nerjavnih jekel. To je še posebej pomembnega pomena pri duplex nerjavnih jeklih. Pomembno je, da so uporabljene primerne metode varjenja, primeren dodajni material zvara in izkušnost varilcev, saj tako ohranimo korozijsko odpornost zvara in okoliškega materiala ter nosilnost zvara. Glavne značilnosti, ki vplivajo na izbiro metode varjenja, so debelina in oblika pločevine, vrsta pločevine in pozicija zvara. Spodaj so našteje najpogostejše metode varjenja, ki se uporabljajo pri varjenju nerjavnih jekel.

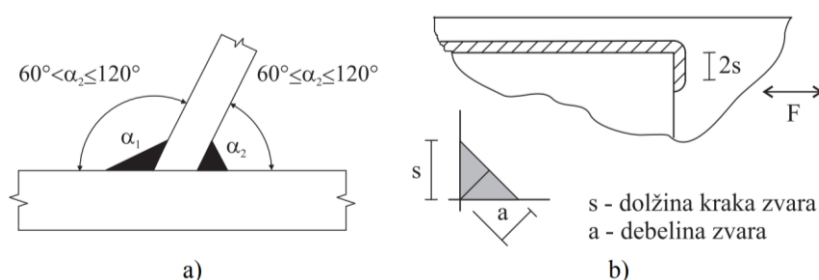
- Varjenje z oplasčeno elektrodo,
- potopno varjenje z žično elektrodo,
- potopno varjenje s trakasto elektrodo,
- varjenje z inertnim plinom (MIG varjenje),
- varjenje z aktivnim plinom (MAG varjenje),
- varjenje z oplasčeno žico z zaščito iz inertnega plina,
- varjenje z volframovo elektrodo (TIG varjenje) ter
- varjenje s plazmo.

Pri varjenju nerjavnih jekel z ogljikovimi jekli, je pomembno, da je dodajni material zvara visoko legiran, da zagotovimo zadostno mehansko odpornost zvara in korozijsko odpornost spoja. S tem preprečimo razredčenje spojenih elementov v okolici zvara na strani nerjavnega jekla.

Pri varjenju nerjavnega jekla z galvaniziranim jeklom, je pomembno, da odstranimo premaz iz cinka v okolici spoja. Prisotnost cinka lahko povzroči krhkost in reducirano korozijsko odpornost končnega zvara. Nevarnost varjenja galvanizirane plasti so hlapi, ki se sproščajo ob varjenju. Po odstranitvi galvanizirane plasti, so napotki za varjenje enaki tistim za varjenje nerjavnih jekel z ogljikovimi jekli. Prekinjeni kotni zvari in prekinjeni delno penetrirani zvari, se naj uporabljajo le v blagih okoljih, da se izognemo možnosti korozije.

4.2 Kotni zvari

Kotne zware lahko uporabimo pri spajanju elementov pod kotom med 60° in 120° . Za kote manjše od 60° je priporočeno, da se uporabijo delno penetrirani čelni zvari. Za kote večje od 120° , se ni dobro zanašati na kotne zware, zaradi prenosa sil. Kotni zvari se ne smejo uporabljati v situacijah, kjer upogibni moment okoli longitudinalne osi zvara povzroča natege v korenu zvara [17]. Geometrijski pogoji so grafično predstavljeni na sliki 14.



Slika 15: Geometrijski pogoji pri kotnih zvarih [18]

Predstandard prEN 1993-1-4 ne podaja posebnih geometrijskih pogojev za kotne zware. Veljajo enaki geometrijski pogoji kot za ogljikova jekla.

Standard prEN 1993-1-4 podaja za izračun projektne nosilnosti zvara dve metodi – direktno in poenostavljeno. Pri direktni metodi je potrebno izračunati komponente napetosti v kritičnem prerezu zvara, med tem ko pri poenostavljeni metodi je merodajna le rezultanta napetosti na prerez zvara z debelino a in efektivno dolžino L_{eff} .

Projektna nosilnost zvara po direktni metodi je dovolj velika, če sta izpolnjena naslednja pogoja:

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

in

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

Kjer so:

$\sigma_{\perp}, \tau_{\perp}, \tau_{\parallel}$... napetosti v zvaru

f_u ... natezna trdnost osnovnega materiala (ne zvara)

β_w	... korelacijski faktor
γ_{M2}	... delni varnostni faktor

Pri poenostavljeni metodi $\sigma_{\perp}$, iz enačbe za izračun po direktni metodi, obravnavamo kot strižno napetost in jo pomnožimo s 3. Dobimo:

$$[\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} = f_{vwd}$$

Kjer je f_{vwd} projektna strižna trdnost zvara. Člen na levi strani enačbe lahko izrazimo z rezultanto napetosti v zvaru in s tem izločimo pomembnost posamezne komponente napetosti oz. orientacije zvara.

$$[\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2]^{0,5} = \frac{F_{Ed}}{A_w} \leq f_{vwd}$$

Trenutni standard SIST EN 1993-1-4 povzema vrednosti za korelacijski faktor β_w iz standarda SIST EN 1993-1-8, ki velja za ogljikova jekla. V predstandardu prEN SIST EN 1993-1-4 pa so te vrednosti drugačne.

Korelacijski faktor β_w za nerjavna jekla po predstandardu prEN 1993-1-4 določimo:

- = 0,9 za zware, ki združujejo avstenitna nerjavna jekla
- = 1,0 za zware, ki združujejo duplex ali feritna nerjavna jekla,
- = 1,0 za zware, ki združujejo različne vrste nerjavnih jekel med sabo in nerjavno jeklo z ogljikovim jeklom

4.3 Čelni zvari

Za projektno nosilnost polno penetriranih čelnih zvarov se vzame projektna nosilnost najšibkejšega priključnega elementa, pod pogojem, da so upoštevani pogoji za varjenje nerjavnih jekel.

Delno penetrirani čelni zvari se lahko uporabljajo pri spojih, ki so obremenjeni le s strižnimi silami. Niso primerni v situacijah, kjer je prisotna natezna sila. Projektna nosilnost delno penetriranega čelnega zvara se lahko izračuna enako kot pri polno penetriranih čelnih zvarih.

4.4 Utrujanje

Do utrujanje konstrukcije ali njenega dela pride, ko je konstrukcija ali njen del podvržen cikličnemu obremenjevanju. Do utrujanja pride pri elementih, ki podpirajo mehanizme za dviganje, ki so podvrženi pomični obtežbi, vibracijam ali osciliranju zaradi vetra.

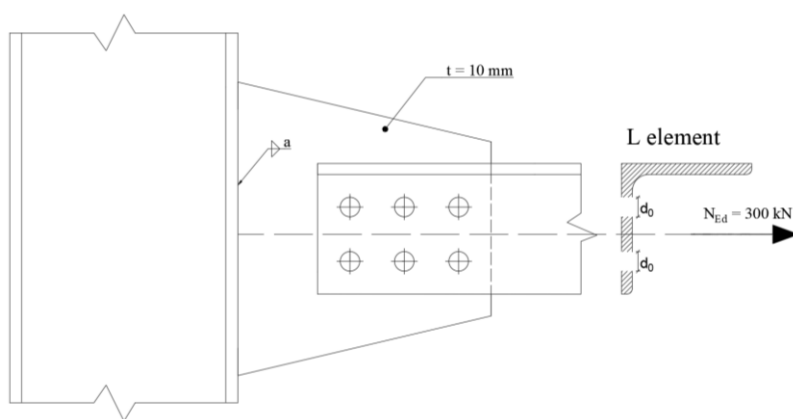
Kombinacija koncentriranih napetosti in strukturnih napak zvara privede do tega, da so ta območja bolj dovzetna za porušitve zaradi utrujanja kot ostala konstrukcija. Odpornost na utrujanje avstenitnih in duplex nerjavnih jekel je primerljiva z ogljikovimi jekli. Porušitvi zaradi utrujanja se lahko izognemo tako, da se izogibamo:

- ostrih zavojev elementa, ki povzročajo koncentracije napetosti,
- nepravnanosti in ekscentričnosti,
- majhnim diskontinuitetam kot so praske,
- nepotrebnemu varjenju in
- delno penetriranim zvarom, čelnim zvarom in prekinjenemu varjenju.

5 RAČUNSKI PRIMERI

5.1 Vijačeni spoj

V analizi je obravnavan vijačen spoj med natezno obremenjenim elementom in vozliščno pločevino. L element dimenzij 120x120x11 mm je privijačen na pločevino debeline 10 mm, katera je potem privarjena na steber. Elementa sta privijačena s šestimi vijaki premera 16 mm (M16) razreda 70. L element in pločevina sta iz avstenitnega nerjavnega jekla 1.4401. V analizi so upoštevana pravila iz sedanjega standarda SIST EN ISO 1993-1-4 in predstandarda prEN 1993-1-4. V primeru razlik med pravili teh dveh standardov se upošteva slednji.



Slika 16: Zasnova vijačenega spoja

- i. Materialne karakteristike nerjavnega jekla 1.4401 in vijaka razreda 70

Nerjavno jeklo 1.4401:

$$f_y = 220 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 530 \text{ N/mm}^2$$

Vijak razreda 70:

$$f_{yb} = 450 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ub} = 700 \text{ N/mm}^2$$

- ii. Projektna strižna nosilnost vijaka:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,8 \cdot 70 \text{ kN/cm}^2 \cdot 1,57 \text{ cm}^2}{1,25} = 70,3 \text{ kN}$$

$$A = A_s = 1,57 \text{ cm}^2$$

$\alpha = 0,8$ (za vijake iz avstenitnega nerjavnega jekla razreda 70, po prEN)

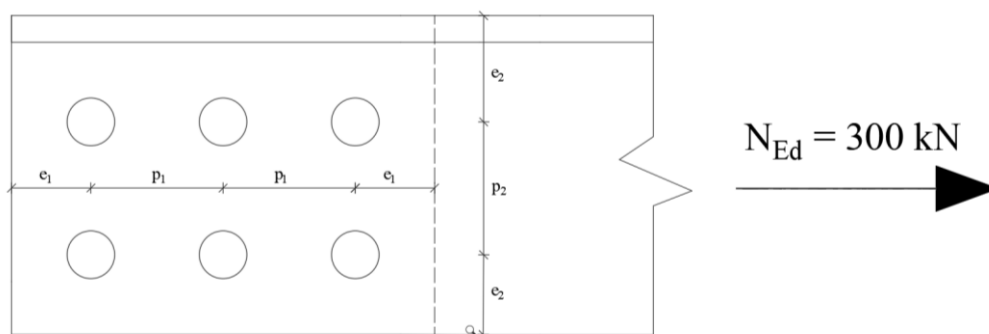
Določitev strižne nosilnosti spoja:

$$m \cdot F_{v,Rd} \cdot n = 1 \cdot 70 \cdot 6 = 420 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 300 \text{ kN} \quad \checkmark$$

$m = 1$...število strižnih ravnin

n ...število vijakov

iii. Pozicija lukenj



Slika 17: Robne oddaljenosti in razmaki med luknjami

Za vijake M16 je potreben premer luknje $d_0 = 18 \text{ mm}$

$$e_1 = 30 \text{ mm}$$

$$e_2 = 30 \text{ mm}$$

$$1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 \text{ mm} = 21,6 \text{ mm} < e_1 \text{ in } e_2 < 4t + 40 = 4 \cdot 10 \text{ mm} + 40 = 80 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$p_1 = 50 \text{ mm}; p_1 > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 18 \text{ mm} = 39,6 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$p_2 = 50 \text{ mm}; p_2 > 2,4d_0 = 2,4 \cdot 18 \text{ mm} = 43,2 \text{ mm} \quad \checkmark$$

iv. Kontrola oslabljenega prereza

$$A_{neto} = A - 2 \cdot d_0 \cdot t_w = 25,4 \text{ cm}^2 - 2 \cdot 1,8 \cdot 1,0 = 21,8 \text{ cm}^2$$

$$N_{f,Ed} = 300 \leq N_{u,Rd} = \frac{\beta \cdot A_{neto} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,52 \cdot 21,8 \text{ cm}^2 \cdot 53 \text{ kN/cm}^2}{1,25} = 480,6 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Redukcijski faktor β za $p_1 = 5\text{ cm}$ in 3 vijake določimo po Pr. 3-48 iz standarda SIST EN 1993-1-8.

v. Projektna nosilnost vijaka na bočni pritisk:

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot t \cdot d}{\gamma_{M2}}$$

Ta primer spada v skupino spoja z debelo priključno pločevino ($t = 10\text{ mm} \geq t_{min} = 4\text{ mm}$).
Računamo po kriteriju nosilnosti.

Izračun koeficienta α_b :

Za robni vijak:

$$\alpha_b = \min\left\{2,5, \frac{5e_1}{6d_0}\right\} = 1,39$$

Za notranji vijak:

$$\alpha_b = \min\left\{2,5, \frac{5p_1}{12d_0}\right\} = 1,16$$

Izračun koeficienta k_1 :

Za robni vijak:

$$k_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{če } \min\left(\frac{e_2}{d_0}, \frac{p_2}{2d_0}\right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{če } \min\left(\frac{e_2}{d_0}, \frac{p_2}{2d_0}\right) \leq 1,5 \end{cases} = 0,8$$

Za notranji vijak:

$$k_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{če } \left(\frac{p_2}{2d_0}\right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{če } \left(\frac{p_2}{2d_0}\right) \leq 1,5 \end{cases} = 0,8$$

Projektna nosilnost vijaka na bočni pritisk za posamezno vrsto vijaka:

Za robni vijak:

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot t \cdot d}{\gamma_{M2}} = \frac{1,39 \cdot 0,8 \cdot 53 \text{ kN/cm}^2 \cdot 1 \text{ cm} \cdot 1,6 \text{ cm}}{1,25 \cdot 10^3} = 75,4 \text{ kN}$$

Za notranji vijak

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot t \cdot d}{\gamma_{M2}} = \frac{1,16 \cdot 0,8 \cdot 53 \text{ kN/cm}^2 \cdot 1 \text{ cm} \cdot 1,6 \text{ cm}}{1,25} = 63 \text{ kN}$$

Projektna nosilnost spoja na bočni pritisk:

$$m \cdot n \cdot F_{b,Rd} = 1 \cdot 6 \cdot 63 \text{ kN} = 301,2 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 300 \text{ kN} \checkmark$$

vi. Strižni iztrg:

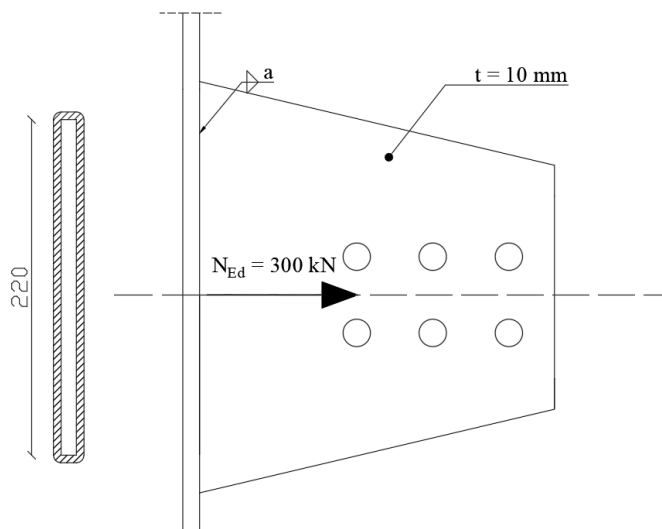
Računam za simetrično obremenjeno skupino vijakov

$$\begin{aligned} V_{eff,1,Rd} &= A_{nt} \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + A_{nv} \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \\ &= 3,2 \text{ cm}^2 \cdot \frac{53 \text{ kN/cm}^2}{1,25} + 17 \text{ cm}^2 \cdot \frac{22 \text{ kN/cm}^2}{\sqrt{3} \cdot 1,10} = 332 \text{ kN} \geq N_{Ed} \checkmark \end{aligned}$$

$$A_{nt} = t_p \cdot (p_2 - d_0) = 1 \text{ cm} \cdot (5 \text{ cm} - 1,8 \text{ cm}) = 3,2 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} = t_p \cdot (2 \cdot p_1 + e_1 - 2,5 \cdot d_0) \cdot 2 = 1 \text{ cm} \cdot (2 \cdot 5 \text{ cm} + 3 \text{ cm} - 2,5 \cdot 1,8 \text{ cm}) = 17 \text{ cm}^2$$

5.2 Varjeni spoj



Slika 18: Zvar vozliščne pločevine na steber (levo) in vozliščna pločevina (desno)

Debelina vozliščne pločevine: $t = 10 \text{ mm}$

Največja debelina zvara za polno nosilnost znaša $0,46t = 4,6 \text{ mm}$.

Izberem debelino kotnega zvara: $a = 4 \text{ mm}$

Višina vozliščne pločevine: 220 mm

Projektno nosilnost zvara računamo po poenostavljeni metodi:

$$A_w = 2a \cdot h = 2 \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 22 \text{ cm} = 17,6 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_w = \frac{N_{Ed}}{A_w} = \frac{300 \text{ kN}}{17,6 \text{ cm}^2} = 17,05 \text{ cm}^2$$

$$f_{vwd} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{53 \text{ kN/cm}^2}{\sqrt{3} \cdot 1,0 \cdot 1,25} = 24,5 \text{ kN/cm}^2 \geq \sigma_w = 17,05 \text{ cm}^2 \quad \checkmark$$

$\beta_w = 1,0$... Korelacijski faktor za zware, ki združujejo ogljikovega jekla z avstenitnimi nerjavnimi jekli po standardu prEN 1993-1-4.

6 ZAKLJUČEK

Spoji iz nerjavnih jekel predstavljajo ključno inženirsko rešitev za konstrukcije, ki zahtevajo visoko odpornost na korozijo in trajnost v različnih okoljskih pogojih. Glavna značilnost teh spojev je uporaba materiala z visoko vsebnostjo kroma, ki zagotavlja odpornost na oksidacijo ter kemične reakcije z agresivnimi snovmi. To omogoča uporabo nerjavnih jekel v zahtevnih industrijskih okoljih, v prehrabeni industriji, medicinskih napravah ter pri gradnji mostov in konstrukcij na obalah morja.

Pri načrtovanju spojev iz nerjavnih jekel je ključno upoštevati njihove specifične mehanske lastnosti. Nižja vsebnost ogljika v primerjavi z ogljikovimi jekli daje nerjavnim jeklom večjo duktilnost, kar je treba upoštevati pri dimenzioniranju in varjenju. Poleg tega je pomembno razumeti vpliv mikrostrukture nerjavnega jekla na njegovo trdnost in togost.

Pri varjenju spojev iz nerjavnih jekel je ključno zagotoviti ustrezne varilne postopke in materiale, ki bodo ohranili visoko korozijsko odpornost spoja. Pravilna izbira tehnike varjenja ter nadzor kvalitete spojev sta ključna za zagotovitev trajnosti konstrukcij.

VIRI

- [1] Design manual for structural stainless steel. 2017. Fourth edition. Berkshire, SCI: 262 str.
<http://www.steel-stainless.org/media/1446/p413-designmanual-structuralstainless-steelbiz.pdf>
(Pridobljeno 31. 8. 2023.)
- [2] Vij, M. 2018. The history of stainless steel.
<https://www.gpss.com/history-of-stainless-steel/> (Pridobljeno 13. 8. 2023.)
- [3] Li, S. 2021. Who constructed the Sydney Opera House. Sydney Build blog, objavljeno 6. 10. 2021.
<https://www.sydneybuildexpo.com/sydney-build-blog/who-constructed-the-sydney-opera-house> (Pridobljeno 20. 8. 2023.)
- [4] Stainless Steel in Construction: Five famous buildings. 2020. BS Stainless blog, objavljeno 18. 8. 2020.
<https://www.bsstainless.com/stainless-steel-in-construction-five-famous> (Pridobljeno 1. 9. 2023.)
- [5] Fischer, T. 2020. Nickel institute. Stainless steel for structural applications: The role of nickel.
<https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/architecture-building-and-construction/stainless-steel-in-structural-applications-the-role-of-nickel/> (Pridobljeno 28. 8. 2023.)
- [6] Design manual for structural stainless steel. 2017. Fourth edition. Berkshire, SCI: str 35.
<http://www.steel-stainless.org/media/1446/p413-designmanual-structuralstainless-steelbiz.pdf>
(Pridobljeno 13. 8. 2023.)
- [7] What are Costs of Stainless Steels – Price. 2023.
<https://material-properties.org/costs-of-stainless-steels-price/> (Pridobljeno 1. 9. 2023.)
- [8] What Makes Stainless Steel Different From Other Metals?. 2021.
<https://www.cmpionline.com/what-makes-stainless-steel-different-from-other-metals>
(Pridobljeno 12. 8. 2023.)

- [9] Vidmar, M. 2018. Izbira materiala valjčnic v pečeh za pregrevanje. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Konstrukcijska smer: str. 8.
<https://core.ac.uk/download/pdf/161409695.pdf> (Pridobljeno 31. 8. 2023.)
- [10] Kubični kristalni sistem. 2023.
https://sl.wikipedia.org/wiki/Kubi%C4%8Dni_kristalni_sistem (Pridobljeno 1. 8. 2023.)
- [11] Chromium. 2023.
<https://www.ssina.com/education/product-resources/alloying-elements/> (Pridobljeno 1. 8. 2023.)
- [12] Sotoodeh, K. 2022. Corrosion study and material selection for cryogenic valves in an LNG plant. V: Sotoodeh, K. (ur.). Cryogenic Valves for Liquefied Natural Gas Plants. Oxford: Gulf Professional Publishing: str. 175–211.
[doi:10.1016/B978-0-323-99584-9.00001-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99584-9.00001-X)
- [13] Carbon. 2023.
<https://www.ssina.com/education/product-resources/alloying-elements/> (Pridobljeno 1. 9. 2023.)
- [14] Söderberg, K., Purtilo, T., Pirhonen, I. 2017. Stalutube stainless steel member calculation guide: Eurocode comparison and learning material for structural engineers. Lahti, Stalutube Oy: str. 6.
<https://stalutube.fi/wp-content/uploads/2022/10/stalutube-stainless-steel-member-calculation-guide.pdf> (Pridobljeno 22. 8. 2023.)
- [15] Baddoo, N. 2006. Erection and Installation of Stainless Steel Components. Luksemburg, Euroinox: str. 18.
<https://nickelinstitute.org/media/2898/erectioninstallation.pdf> (Pridobljeno 1. 9. 2023.)
- [16] Allopio, L. 2021. Analisi e applicazione del metodo CBFEM. Magistrsko delo. Torino, Politecnico Di Torino, Dipartimento di Ingegneria Civile, Corso di Laurea di II livello in Ingegneria Civile sez. Strutture: str. 14.
<https://webthesis.biblio.polito.it/21331/1/tesi.pdf> (Pridobljeno 22. 8. 2023.)
- [17] prEN1993-1-4:2021, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1.–4. del: Splošna pravila – Dodatna pravila za nerjavna jekla.

- [18] Beg, D. 2010. Projektiranje jeklenih konstrukcij v skladu z Evrokodom 3: kratek povzetek. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 111 str.
http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmpoze/Projektiranje%20jeklenih%20konstrukcij_povzetek_16.11.2010.pdf (Pridobljeno 8. 8. 2023.)
- [19] Varjenje nerjavnega jekla (inoxa) in kaj je dobro vedeti. 2019. Blog Varjenje in rezanje, objavljeno 10. 6. 2019.
<http://varjenje-rezanje.info/index.php/pretekke-objave/25-varjenje-nerjavnega-jekla-inoxa-in-kaj-je-dobro-vedeti> (Pridobljeno 7. 8. 2023.)
- [20] SIST EN 1993-1-4:2006, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1–4. del: Splošna pravila – Dodatna pravila za nerjavna jekla.
- [21] SIST EN 1993-1-8:2005, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1.–8. del: Projektiranje spojev.
- [22] Povhe, T. 2016. Ali je galvanska korozija vrsta magije v navtiki?
<https://www.val-navtika.net/article/ali-je-galvanska-korozija-vrsta-magije-v-navtiki/>
(Pridobljeno 3. 8. 2023.)
- [23] Galvanska korozija okovja. 2010.
<https://www.val-navtika.net/article/galvanska-korozija-okovja/> (Pridobljeno 17. 8. 2023.)
- [24] Jun, J., Lim, Y. C., Li, Y., Warren, C. D., Feng, Z. 2021. Mitigation of Galvanic Corrosion in Bolted Joint of AZ31B and Carbon Fiber-Reinforced Composite Using Polymer Insulation. Materials. 14, 7: 1670.
[doi:10.3390/ma14071670](https://doi.org/10.3390/ma14071670)
- [25] Pučnik, V. 2019. Posebnosti projektiranja konstrukcijskih elementov iz nerjavnih jekel. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Gradbena smer: 38 str.
<https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=122410&lang=slv> (Pridobljeno 1. 9. 2023.)
- [26] SIST EN ISO 3506-1:2020: Fasteners – Mechanical properties of corrosion-resistant stainless steel fasteners – Part 1: Bolts, screws and studs with specified grades and property classes.

- [27] T Head Screw Bolts M5 M6 M8 304 Stainless Steel Metric Thread T Shape Square Hammer Head Type Screw Bolt Fastener chute T-bolt. 2023.
https://www.aliexpress.com/item/33012250694.html?pdn_npi=3%40dis%21USD%211.75%211.75%21%21%21%21%21%40211675c516947081924551806e325c%2167067459001%21affd%21%21&dp=340836-147477.16667972&aff_fcid=493f9c035e5a45d4a35a997b9dc7f6c2-1694708193087-05923&aff_fsk&aff_platform=api-new-product-detail&sk&aff_trace_key=493f9c035e5a45d4a35a997b9dc7f6c2-1694708193087-05923&terminal_id=ec2371f10014bea9bc1beabc1052fa7&afSmartRedirect=y (Pridobljeno 31. 8. 2023.)
- [28] Nijgh, M., Rudolf, A., Jakobsen, E., Ebert, A., Huckshold, M. Cook, M. 2019. Execution and reliability of slip resistant connections for steel structures using CS and SS (SIROCO). Final report. Bruselj, Evropska komisija: 160 str.
<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fe331d9c-460e-11e9-a8ed-01aa75ed71a1> (Pridobljeno 13. 8. 2023.)