

Nehrđajući čelici i čelici otporni na koroziju

Ljuban, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:514538>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ante Ljuban

**NEHRĐAJUĆI ČELICI I ČELICI OTPORNI NA
KOROZIJU**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ante Ljuban

NEHRĐAJUĆI ČELICI I ČELICI OTPORNI NA KOROZIJU

ZAVRŠNI ISPIT

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivan Ćurković

Zagreb, 2025.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ante Ljuban

**STAINLESS STEELS AND CORROSION-
RESISTANT STEELS**

FINAL EXAM

Supervisor: assoc. prof. dr. sc. Ivan Ćurković

Zagreb, 2025.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

Ante Ljuban (Ime i prezime)	0082069561 (JMBAG)
--------------------------------	-----------------------

zadovoljio/la je na pisanom dijelu završnog ispita pod naslovom:

Nehrđajući čelici i čelici otporni na koroziju
(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

Stainless steel and corrosion resistant steel
(Naslov teme završnog ispita na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

-
(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

-
(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum: 19.2.2025.

Mentor: izv.prof.dr.sc. Ivan Ćurković

Potpis mentora: Ivan Ćurković

Komentor: -



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela završnog ispita i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom prijediplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio završnog ispita bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

ZAHVALE

Ovim putem se želim zahvaliti mentoru izv. prof. dr. sc. Ivanu Ćurkoviću na pomoći i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se i svim prijateljima i obitelji što su mi bili podrška tijekom studiranja.

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada su nehrđajući čelici i čelici otporni na koroziju.

Nakon kratkog uvoda u rad opisan je pojam korozije, te su navedene i ukratko objašnjene vrste korozije. Nakon toga je dan pregled čeličnih materijala koji nemaju problema s korozijom, te su navedene i opisane vrste nehrđajućih čelika i čelika otpornih na koroziju. Zadnje poglavlje rada vezano je uz razlike proračuna običnih i nehrđajućih čelika prema Eurokodu.

Ključne riječi: čelik, korozija, nehrđajući čelici, čelici otporni na koroziju, Eurokod.

SUMMARY

The topic of this final exam are stainless steels and corrosion-resistant steels.

After a brief introduction to the final exam, the concept of corrosion is described and the types of corrosion are listed and briefly explained. After that, an overview of steel materials that do not have problems with corrosion was given and types of stainless steels and corrosion-resistant steels are listed and described. The last chapter of the final exam is refers to the differences in the calculation of ordinary and stainless steels according to Eurocode.

Key words: steel, corrosion, stainless steels, corrosion-resistant steels, Eurocode.

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	1
2. KOROZIJA.....	2
2.1. Općenito o koroziji.....	2
2.2. Vrste korozije.....	3
2.2.1. Podjela prema mehanizmu djelovanja.....	4
2.2.1.1. Kemijska korozija.....	4
2.2.1.2. Elektrokemijska korozija.....	5
2.2.2. Podjela prema geometrijskom obliku razaranja	6
2.2.2.1. Opća korozija	6
2.2.2.2. Selektivna korozija	7
2.2.2.3. Interkristalna korozija	8
2.2.2.4. Lokalna korozija	9
3. ČELIČNI MATERIJALI KOJI NEMAJU PROBLEMA SA KOROZIJOM	11
3.1. Čelici otporni na koroziju.....	11
3.1.1. Vrste čelika otpornih na koroziju.....	12
3.1.1.1. Corten čelik.....	13
3.1.1.2. Patinax čelik.....	15
3.2. Nehrđajući čelici	16
3.2.1. Podjela i vrste nehrđajućih čelika.....	17
3.2.1.1. Austenitni nehrđajući čelici	18
3.2.1.2. Feritni nehrđajući čelici	19
3.2.1.3. Dupleks (austenitno-feritni) nehrđajući čelici.....	20
3.2.1.4. Martenzitni nehrđajući čelici.....	21
3.2.2. Trajnost i primjena nehrđajućih čelika	22
4. NEHRĐAJUĆI I OBIČNI ČELICI – RAZLIKE PRORAČUNA PREMA EC3.....	25
4.1. Klasifikacija poprečnog presjeka	27
4.2. Parcijalni koeficijenti sigurnosti.....	28

4.3.	Granično stanje nosivosti.....	29
4.3.1.	Vlačna otpornost u rupama za vijke.....	29
4.3.2.	Posmik.....	30
4.3.3.	Proračun elemenata jednolikog poprečnog presjeka napregnutih tlakom.....	31
4.3.4.	Proračun elemenata jednolikog poprečnog presjeka napregnutih savijanjem....	32
4.3.5.	Proračun elemenata jednolikog poprečnog presjeka napregnutih savijanjem i osnim tlakom.....	33
4.4.	Granično stanje uporabljivosti	34
4.5.	Proračun spojeva – vijčani spojevi.....	35
5.	ZAKLJUČAK.....	37
	POPIS LITERATURE	38
	POPIS SLIKA.....	41
	POPIS TABLICA.....	42

1. UVOD

Prije više od 3000 godina ljudi su prepoznali čelik kao materijal koji im je olakšavao život i poboljšavao kvalitetu života, te su ga već tada počeli koristiti. Čelik se koristio kroz čitavu povijest, koristi se i danas, i sigurno će se koristiti i u budućnosti. Upravo iz tog razloga, ljudi čelik nazivaju materijalom povijesti, sadašnjosti i budućnosti [1].

Čelik je željezna legura s ugljikom i raznim pratećim i legirajućim elementima. Prilikom proizvodnje čelika, htjeli to ili ne, u sastavu čelika se javljaju prateći elementi. Ti prateći elementi mogu biti poželjni i nepoželjni. Poželjni prateći elementi su primjerice mangan i silicij, a nepoželjni prateći elementi su dušik, vodik, kisik, fosfor i sumpor [1]. S druge strane, legirajući elementi su elementi koje namjerno dodajemo kako bi poboljšali određena svojstva čelika. Legirajući elementi su primjerice aluminij, bakar, krom, molibden, nikal, vanadij i volfram.

Čelik, kao i svaki materijal, ima određene prednosti i mane. Prednosti čelika su raznovrsnost područja primjene, stalni razvoj novih vrsta čelika, odlični tehnički i estetski zahtjevi, višestruka mogućnost prerade, recikličnost materijala, velike rezerve sirovina u prirodnim resursima [1]. Zbog brojnih prednosti, čelik ima široko područje primjene. Koristi se u graditeljstvu, strojarstvu, brodogradnji, elektrotehnici, aeronautici itd.

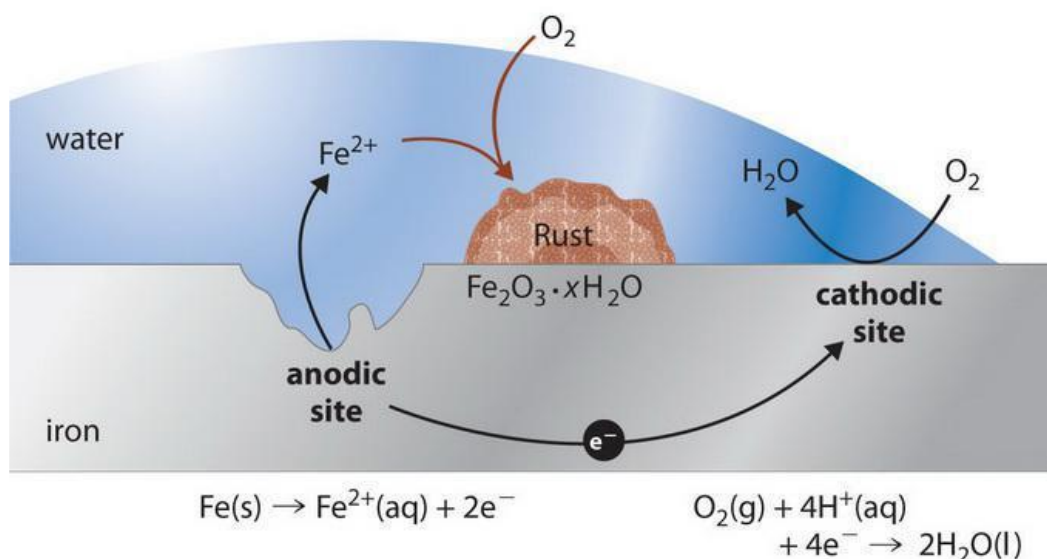
Kao i na svaki materijal, i na čelik djeluju određene pojave i procesi koji mu nepoželjno mijenjaju svojstva, te utječu na njegovu postojanost. Upravo takva nepoželjna pojava kod čelika je korozija. Korozija je pojava koja uništava materijal, odnosno troši ga. Postoje i vrste čelika koje zbog određenih legirajućih elemenata u svome sastavu nisu osjetljivi na korozijsko djelovanje. Primjer takvih vrsta čelika su nehrđajući čelici i čelici otporni na koroziju. Glavna razlika između običnih čelika i čelika koji nemaju problema s korozijom je u njihovom sastavu. Zbog različitog sastava, oni imaju i različite mehaničke osobine. Zbog različitih mehaničkih osobina i proračun običnih i nehrđajućih čelika se razlikuje. Dio proračuna je jednak, međutim postoje određeni dijelovi proračuna koji se razlikuju.

2. KOROZIJA

2.1. Općenito o koroziji

Korozija je nepoželjno trošenje materijala kemijskim djelovanjem fluida (plinova ili kapljevina). Riječ korozija dolazi od latinske riječi *corrodere*, što u prijevodu znači nagrizati [2]. Korozija nagriza, odnosno troši konstrukcijski materijal. Kada govorimo o koroziji, najčešće mislimo na koroziju metala, međutim ova pojava razaranja djeluje i na druge materijale kao što su beton, keramika, kamen, staklo i dr. [3].

Ukoliko razmatramo metal, korozija je kemijska ili elektrokemijska reakcija metala s nekom drugom tvari u okolini pri kojoj dolazi do izmjene elektrona. Događa se u trenutku kada u zraku željezo, kisik i voda (u bilo kojem agregatnom stanju) dođu u izravan dodir. U tom trenutku zbog velike razlike u elektropotencijalu kod željeza i kisika dolazi do elektrokemijske reakcije. Prilikom te reakcije, željezo teži gubitku elektrona i stvaranju kationa, a kisik teži stvaranju negativnih iona privlačenjem elektrona [4]. Kraće rečeno, željezo otpušta elektrone, a kisik ih prima i događa se redukcija kisika, odnosno oksidacija željeza. Oksidacijom željeza nastaje korozija, odnosno hrđa. Nastanak korozije ubrzavaju okolišni faktori. Ti okolišni faktori su vlažnost zraka, kisik, kloridi i temperatura. Prethodno opisani proces prikazan je na slici 1.



Slika 1.: Prikaz oksidacije željeza i redukcije kisika [4]

Korozija je prirodan proces. Metale dobivamo iz prirodnih minerala i ruda uz pomoć dovoljne količine energije. I kada taj metal vratimo u prirodu, u okoliš, on teži vraćanju u svoje prvotno stanje, a to postiže spajanjem s drugim tvarima u okolišu i oslobađanjem energije, odnosno korozijom [5]. Stoga za koroziju možemo reći da je prirodna pojava, koja uništava naš metal, odnosno vraća ga u prvotno stanje. Takav proces dobivanja metala i vraćanja metala u prvotno stanje naziva se termodinamički proces.

Kada govorimo o pojavama i procesima koji utječu na svojstva metala, korozija je zasigurno pri vrhu te ljestvice. Korozija jako utječe na smanjenje čvrstoće i funkcionalnosti materijala. Djeluje na materijale na način da ih pretvara u neupotrebljive stvari. Troši ih sve dok ih u potpunosti ne potroši. Zbog djelovanja korozije, dolazi do smanjenja vijeka trajanja elementa, a samim time i do povećanja troškova zamijene elemenata i slično [3]. Međutim korozija se može spriječiti, odnosno može se usporiti njeno djelovanje. To se postiže različitim postupcima zaštite od korozije. Zaštita se najčešće izvodi premazivanjem različitim premazima, ali postoje i drugi načini zaštite od korozije [5]. Zaštita od korozije se odnosi na obične čelike, koji su osjetljivi na djelovanje korozije, te im je potrebna zaštita. Postoje i vrste čelika koje nisu osjetljive na korozijsko djelovanje i kojima nije potrebna zaštita od korozije, a to su npr. nehrđajući čelici i čelici otporni na koroziju. Ove vrste čelika u svome sastavu imaju određene legirajuće i druge elemente, koji im daju otpornost na koroziju.

2.2. Vrste korozije

Osnovna podjela korozije je prema materijalu koji korodira i dijelimo je na: koroziju metalnih konstrukcijskih materijala i nemetalnih konstrukcijskih materijala, odnosno koroziju metala i koroziju nemetala. Prema mehanizmu djelovanja koroziju dijelimo na: kemijsku koroziju (u neelektrolitima) i elektrokemijsku koroziju (u elektrolitima). Prema geometrijskom obliku razaranja dijelimo je na: opću koroziju, selektivnu koroziju, interkristalnu koroziju i lokalnu koroziju, koju još dijelimo na pjegastu, rupičastu, potpovršinsku i kontaktnu koroziju [3].



Slika 2.: Klasifikacija korozijskih procesa [6]

2.2.1. Podjela prema mehanizmu djelovanja

2.2.1.1. Kemijska korozija

Kemijska korozija metala je kemijska reakcija atoma osnovnog materijala (metala) s molekulama drugog elementa ili spoja iz okoline [7]. Ta reakcija se odvija u neelektrolitima, odnosno u medijima koji ne provode električnu struju. Ovom reakcijom ne nastaju slobodni ioni, već direktno nastaju produkti. Ti produkti su najčešće oksidi i sulfidi. Ovisno o mediju u kojem se odvija, kemijsku koroziju dijelimo na: plinsku koroziju i koroziju u tekućim neelektrolitima [3]. Plinska korozija se odvija u vrućim plinovima. Plinska korozija nastaje jedino ako se radi o suhim plinovima, odnosno ako pri visokim temperaturama na metalu ne može nastati tekuća voda ili vodena otopina. Korozija u vrućim plinovima se najčešće događa prilikom neke toplinske obrade metala, lijevanja, varenja ili zavarivanja. Primjer korozije u tekućim neelektrolitima je razaranje metala u nafti pod utjecajem sumpora ili njegovih spojeva. Primjer kemijske korozije možemo vidjeti na slici 3.



Slika 3.: Primjer kemijske korozije [7]

2.2.1.2. Elektrokemijska korozija

Elektrokemijska korozija je korozija koja se javlja na metalima i legurama u dodiru s elektrolitima. Elektroliti mogu biti voda ili vodene otopine kiselina, lužina i soli. Prilikom dodira metala i elektrolita odvijaju se procesi oksidacije i redukcije [6]. Kada govorimo o elektrokemijskoj koroziji razlikujemo dva procesa - anodni i katodni proces [5]. Anodni proces se odvija u anodi. Anoda je područje gubitka elektrona. Ti elektroni se oslobađaju prilikom oksidacije. Katodni proces se odvija u katodi. Katoda je područje dobivanja elektrona. Ti elektroni se vežu prilikom procesa redukcije. Ovaj tip korozije se događa često. Razlog tome je taj što je velik broj metalnih konstrukcija izložen vodi i vlazi. Primjer elektrokemijske korozije možemo vidjeti na slici 4.



Slika 4.: Primjer elektrokemijske korozije [8]

2.2.2. Podjela prema geometrijskom obliku razaranja

2.2.2.1. Opća korozija

Opća korozija najčešće nastaje prilikom direktnog dodira metala s korozivnim medijem. Najčešće se javlja kod metalnih elemenata koji imaju veliku površinu, te je ta cijela površina izložena djelovanju korozivnog medija. Opću koroziju prepoznamo po stvaranju sloja hrđe po cijeloj površini metala [3]. Razlikujemo ravnomjernu i neravnomjernu opću koroziju. U praksi opća korozija je najmanje opasna korozija, posebno kada se radi o ravnomjernoj općoj koroziji, jer vrlo lako možemo pratiti tijek razvijanja korozije, lako procijenimo vijek trajanja elementa te lako odredimo trenutak kada stari element trebamo zamijeniti novim elementom [6]. Neravnomjerna opća korozija je opasnija od ravnomjerne, razlog tome je što su određeni dijelovi elementa više korozivno napadnuti i oštećeni od ostalih te je malo teže odrediti vijek trajanja elementa i složeniji je postupak održavanja, odnosno eventualnog popravka elementa (ako je popravak uopće moguć).



Slika 5.: Primjer neravnomjerne opće korozije [6]

2.2.2.2. Selektivna korozija

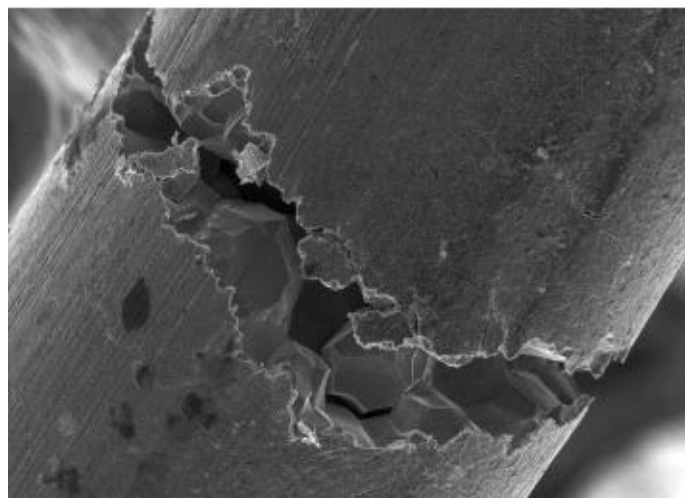
Selektivna korozija je korozija koja uništava ili jednu fazu višefazne legure ili jednu komponentu višekomponentne legure. Uvijek napada manje plemenitu komponentu. Primjer uništavanja jedne faze višefazne legure je grafitizacija sivog lijeva [9]. Ova pojava se najčešće razvija u morskoj vodi. Primjer uništavanja jedne komponente višekomponentne legure je decinkacija mjedi. Decinkacija mjedi je pojava koja nastaje kada se cink otapa iz mjedi, odnosno legure bakra s cinkom, ili neke druge legure koja ima značajan postotak cinka [7]. Ova vrsta korozije se rijetko pojavljuje. Najčešće započinje na površini elementa i širi se prema unutrašnjosti elementa, a može se i dogoditi da započne u unutrašnjosti i krene se širiti prema van [6]. Teško je uočljiva jer ne uzrokuje značajne, lako primjetne promjene u dimenzijama elementa, pa je i vrlo opasna jer metal napadnut ovom vrstom korozije bude jako oslabljen i bude podložan lomu. Prikaz ove vrste korozije dan je na slici 6.



Slika 6.: Primjer selektivne korozije [10]

2.2.2.3. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija nastaje kada granice zrna korodiraju puno lakše od samih zrna. Razara materijal duž granica zrna kristala, šireći se u dubinu i to dovodi do propadanja materijala iznutra [9]. Ovaj oblik korozije je ujedno i najopasniji oblik korozije jer se teško primjećuje, a naglo smanjuje čvrstoću metala te može dovesti do loma materijala ili do raspadanja materijala u zrna. Interkristalna korozija najčešće napada nehrđajuće čelike i legure na bazi nikla i aluminija [7].



Slika 7.: Primjer interkristalne korozije čelične cijevi [7]

2.2.2.4. Lokalna korozija

Lokalna korozija je najrašireniji oblik korozije. Napada samo dijelove izložene površine. Nastaje na granici zrna materijala i brzo se širi samo na manjem lokalnom području [9]. Jedan je od opasnijih oblika korozije, jer se jako teško otkriva i vrlo je nepredvidiv njen daljnji razvoj. Lokalnu koroziju dijelimo na pjegastu, rupičastu, potpovršinsku i kontaktnu koroziju. Pjegasta korozija je najučestalija pojava lokalne korozije te je njen primjer prikazan na slici 8.



Slika 8.: Primjer pjegaste korozije [11]

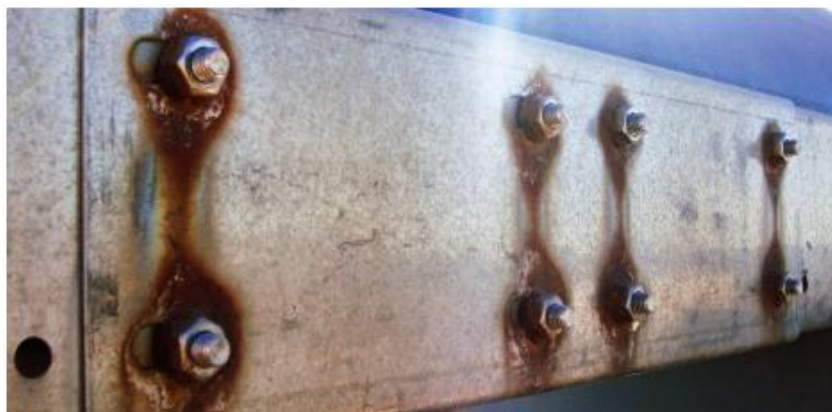
Rupičasta ili točkasta korozija je korozija prilikom koje na površini nastaju šupljine i protežu se u dubinu metala [9]. Prilikom ove korozije ne dolazi do značajnog smanjivanja mase materijala. Pojavljuju se rupice kojima se teško određuje dubina i širina, a s vremenom se dubina nekoliko puta povećava u odnosu na širinu rupica te je jako teško odrediti koliki je dio materijala oštećen [6]. Najčešće se otkrije nakon što dođe do puknuća stijenke [3]. Upravo zbog toga je rupičasta korozija jedna od najopasnijih vrsta korozije. Ova vrsta korozije najčešće napada nehrđajuće čelike, pogotovo one u morskoj vodi. Rupičasta korozija prikazana je na slici 9.



Slika 9.: Primjer rupičaste korozije [12]

Potpovršinska korozija je korozija koja se pojavljuje kada se žarišta točkaste korozije šire u dubinu materijala, te se materijal raslojava [9]. Najučestaliji je oblik korozije u valjanim metalima, i do ove vrste korozije dolazi prilikom dodira metala s morskom vodom i s kiselinama.

Kontaktnu koroziju dijelimo na galvansku koroziju i koroziju u procjepu. Galvanska korozija je korozija koja se javlja kada se dva različita metala dovedu u električni kontakt uz prisutnost elektrolita, što rezultira stvaranjem galvanskog članka, koji ubrzava korodiranje jednog od metala [9]. Korozija u procjepu je slična rupičastoj koroziji. Razlika je što korozija u procjepu nema rupica, nego ima procjepe. Nastaje zbog razlike u koncentraciji elektrolita između dva konstrukcijska elementa.



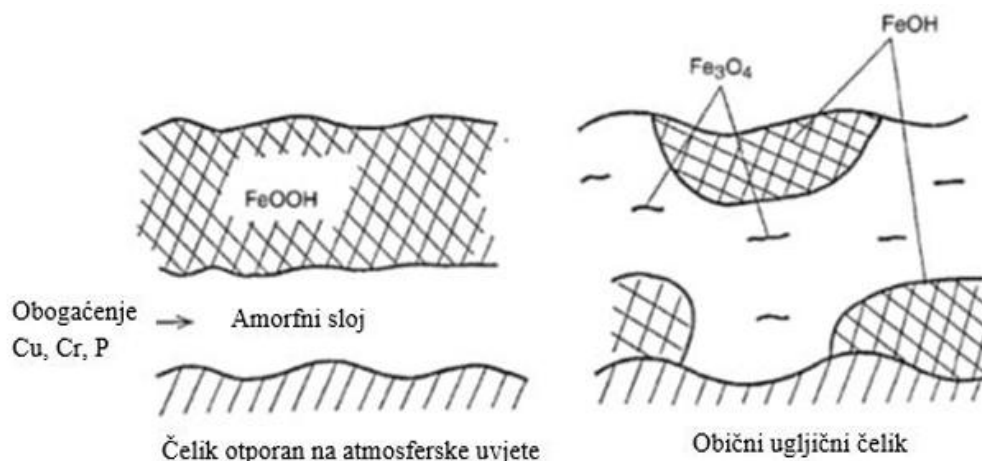
Slika 10.: Primjer galvanske korozije [13]

3. ČELIČNI MATERIJALI KOJI NEMAJU PROBLEMA SA KOROZIJOM

3.1. Čelici otporni na koroziju

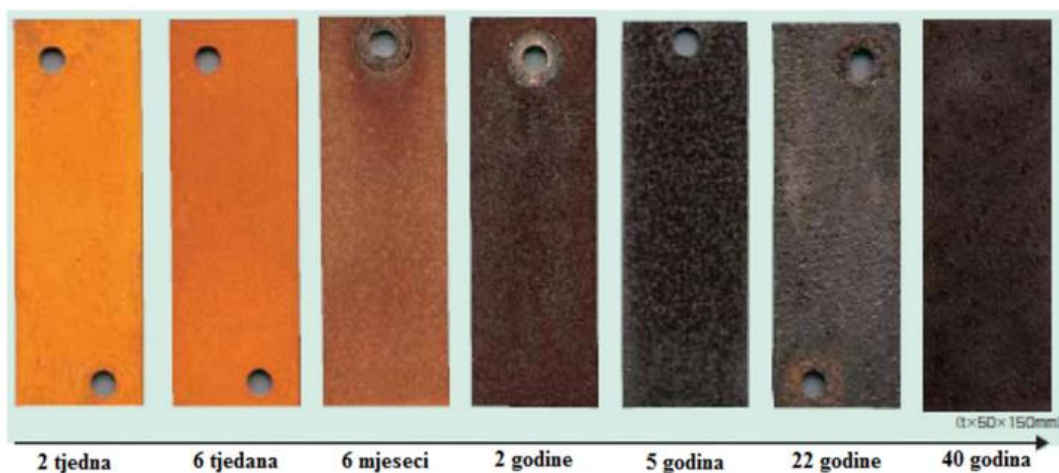
Čelici otporni na koroziju, odnosno čelici poboljšane otpornosti na vremenske uvjete su niskougljični čelici kojima su dodani mali postotci legirajućih elemenata. Spadaju u niskolegirane čelike. Zbog male količine ugljika u svome sastavu (manje od 0,3%) ovaj čelik ima povećanu duktilnost. Zbog legirajućih elemenata u svome sastavu, ova vrsta čelika ima veću čvrstoću i veću otpornost na koroziju u odnosu na obične ugljične čelike. Postoji mnogo legirajućih elemenata koji se dodaju čeliku da bi postao otporan na koroziju, ali tri najvažnija legirajuća elementa su bakar, krom i nikal [14].

Prilikom djelovanja korozije, čelik otporan na koroziju se ne ponaša poput običnih čelika, ali ni poput nehrđajućih čelika. Prilikom korozije, kod običnih čelika se stvara sloj hrđe koji se odlomi, i onda to omogućuje stvaranje novog sloja hrđe. Taj se postupak ponavlja sve dok se čelik u potpunosti ne uništi. Nehrđajući čelici zbog svog sastava opće ne hrđaju. A čelici otporni na koroziju hrđaju, ali na način da se samo na površini stvori sloj hrđe, koji se naziva patina. Patina se ponaša kao barijera i sprječava daljnji prodor vlage, kisika i onečišćenja, odnosno sprječava daljnje hrđanje materijala [14]. Patina se konstantno regenerira i oblikuje tijekom vremena, zbog čega se ova vrsta čelika naziva „samozaštitni čelik“ [15].



Slika 11.: Prikaz strukture hrđe čelika otpornog na koroziju i običnog čelika [16]

U svome životnome vijeku patina, a samim time i materijal, nekoliko puta promjeni boju. Na početku bude prljavo žute boje, onda narančaste, nakon toga svjetlo smeđe te konačno tamno smeđe boje. Na slici 12 vidimo promjenu boje patine tijekom vremena.



Slika 12.: Promjena boje patine tijekom vremena [17]

Niskolegirani čelici otporni na koroziju imaju brojne prednosti. Određene vrste imaju veliku otpornost na toplinu, pa se mogu koristiti pri visokim temperaturama. Imaju dobru čvrstoću i žilavost. Ovi čelici imaju bolju otpornost na koroziju u odnosu na obične ugljične čelike, ali lošiju u odnosu na nehrđajuće čelike [18]. Ovaj čelik je dugotrajan, lako se reciklira te je ekonomičan i isplativ. Zbog malog udjela legirajućih elemenata u svome sastavu, posebno nikla, koji je najskuplji legirajući element, cijena niskolegiranih čelika otpornih na koroziju je u najmanju ruku prihvatljiva, posebno kada se usporedi s cijenom nehrđajućih čelika.

3.1.1. Vrste čelika otpornih na koroziju

Dobre mehaničke osobine, dobra cijena i dobra otpornost na koroziju samo su neki od razloga zašto su stručnjaci počeli malo više proučavati niskolegirane čelike otporne na koroziju. Pokušavali su razne kombinacije i udjele legirajućih elemenata u sastavu čelika, sve da bi dobili optimalan čelik. Neke od takvih vrsta koje su na kraju i patentirane su Corten čelik (Corten-A i Corten-B) i Patinax [20].

3.1.1.1. Corten Čelik

Corten čelik je čelik koji je otporan na atmosfersku koroziju. U samom imenu ove vrste čelika su sadržane njegove dvije najbitnije osobine. "Cor" označava otpornost na koroziju (engl. Corrosion), a "ten" označava vlačnu čvrstoću. U svome sastavu sadrži ugljik (manje od 0,2%) te legirajuće elemente poput bakra, kroma, nikla, fosfora i silicija. Bakar je posebno bitan, jer je ovaj legirajući element jedan od najzaslužnijih za stvaranje oksidnog sloja – patine [21]. Proizvodi od ove vrste čelika se prodaju bez sloja hrđe. Sloj hrđe nastaje kada se proizvod izloži atmosferskim djelovanjima. Nakon što nastane sloj hrđe, proizvod je siguran od daljnjeg djelovanja korozije. Postoje dvije vrste Corten čelika. To su Corten-A čelik i Corten-B čelik.



Slika 13.: Primjer građevine od Corten čelika [22]

Corten-A čelik je hladno valjani čelik. Uglavnom je u obliku ploče. Američko društvo za ispitivanje i materijale (ASTM) za ovu vrstu čelika koristi oznaku A-242, a u Europi i Hrvatskoj se koristi oznaka S355 J0WP [20]. Debljina Corten-A čelika je 6-12 mm, najmanja granica razvlačenja je 345 N/mm², dok vlačna čvrstoća iznosi najmanje 485 N/mm² i istezljivost je oko 20%. Mehanička svojstva Corten-A čelika prikazana su u tablici 1. Zbog svoje dobre otpornosti na atmosfersku koroziju, čelik S355 J0WP najčešće se koristi prilikom izrade

cjevovoda, kontejnera, dimnjaka, vagona i dr. [16]. U zadnje vrijeme se koristi pri izradi umjetničkih djela. Ne preporučuje se koristiti za konstrukcije koje su pod velikim opterećenjem.

Tablica 1.: Mehanička svojstva Corten-A čelika [20]

Debljina [mm]	R_e [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A [%]
6-12	>345	>485	20

U kemijskom sastavu Corten-A čelika se nalazi 0,12% ugljika, 0,2-0,5% mangana, 0,07-0,15% fosfora, 0,03% sumpora, 0,25-0,75% silicija, 0,65% nikla, 0,5-1,25% kroma i 0,25-0,55% bakra [20]. Kemijski sastav je prikazan u tablici 2.

Tablica 2.: Kemijski sastav Corten-A čelika [20]

Element	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu
Udio [%]	0,12	0,2-0,5	0,07-0,15	0,03	0,25-0,75	0,65	0,5-1,25	0,25-0,55

Corten-B čelik je vruće valjani čelik. Najčešće je u obliku ploče i cijevi. ASTM za ovu vrstu čelika koristi oznaku A-588, a u Europi i Hrvatskoj se koristi oznaka S355 J2W [20]. Debljina Corten-B čelika je 6-40 mm, minimalna granica razvlačenja je 345 N/mm², vlačna čvrstoća je minimalno 485 N/mm² i istezljivost je oko 19%. Mehanička svojstva Corten-B čelika prikazana su u tablici 3. Ova vrsta čelika se koristi kao čelični konstrukcijski okvir, prilikom izrade dimnjaka, mostova i dr. [16].

Tablica 3.: Mehanička svojstva Corten-B čelika [20]

Debljina [mm]	R_e [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A [%]
6-40	>345	>485	19

U kemijskom sastavu Corten-B čelika se nalazi 0,19% ugljika, 0,8-1,25% mangana, 0,035% fosfora, 0,03% sumpora, 0,3-0,65% silicija, 0,4% nikla, 0,4-0,65% kroma, 0,25-0,4% bakra i 0,02-0,1% vanadija [20]. Kemijski sastav je prikazan u tablici 4.

Tablica 4.: Kemijski sastav Corten-B čelika [20]

Element	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu	V
Udio [%]	0,19	0,8-1,25	0,035	0,03	0,3-0,65	0,4	0,4-0,65	0,25-0,4	0,02-0,1

3.1.1.2. Patinax čelik

Patinax čelik je vrsta čelika otpornih na atmosfersku koroziju proizveden prema europskoj normi EN 10025-5. Patinax čelik se ponaša kao i ostale vrste čelika otpornih na koroziju. Na površini stvara sloj hrđe koji mu daje otpornost na koroziju, a ima i dobre mehaničke osobine. Postoji nekoliko vrsta Patinax čelika, i one su: Patinax 355, Patinax 355P i Patinax 275PK [23]. Mehanička svojstva Patinax 355P čelika dana su u tablici 5. Debljina Patinax 355P čelika je najviše 12,5 mm, najmanja granica razvlačenja je 355 N/mm², vlačna čvrstoća je 470-630 N/mm² i istezljivost je minimalno 20%.

Tablica 5.: Mehanička svojstva Patinax 355P čelika [23]

Debljina [mm]	R _e [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A [%]
maks. 12,5	≥355	470-630	≥20

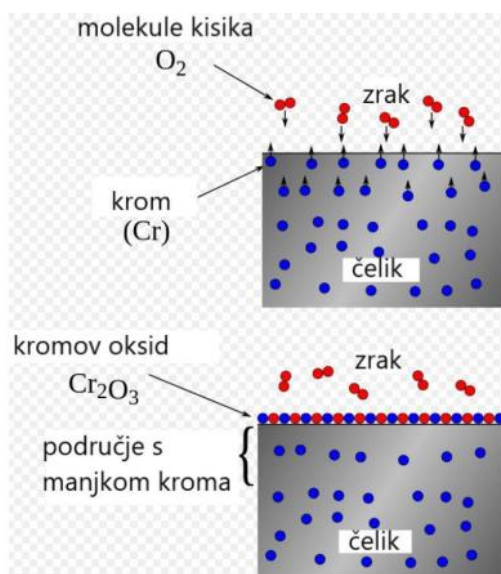
Razlika između vrsta Patinax čelika je u udjelu legirajućih elemenata u sastavu. U kemijskom sastavu Patinax 355P čelika nalazi se manje od 0,12% ugljika, 0,2-0,5% mangana, 0,07-0,15% fosfora, manje od 0,03% sumpora, 0,25-0,75% silicija, manje od 0,65% nikla, 0,5-1,25% kroma, i 0,25-0,55% bakra [23]. Kemijski sastav je prikazan u tablici 6.

Tablica 6.: Kemijski sastav Patinax 355P čelika [23]

Element	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu
Udio [%]	<0,12	0,2-0,5	0,07-0,15	<0,03	0,25-0,75	<0,65	0,5-1,25	0,25-0,55

3.2. Nehrdajući čelici

Nehrdajući čelici su čelici koji zbog svog kemijskog sastava imaju povećanu otpornost na koroziju. Nehrdajući čelici uopće ne hrđaju. Sinonimi za nehrđajući čelik su inox i korozijski postojani čelik [24]. Nehrdajući čelici spadaju u visokolegirane čelike, jer u njihovom kemijskom sastavu se osim osnovnog elementa (željeza) nalazi i značajan udio legirajućih elemenata, prvenstveno kroma. Krom je legirajući element, koji daje čeliku otpornost na koroziju. Da bi čelik bio nehrđajući, odnosno da bi imao dovoljno dobru otpornost na koroziju, u njegovom se sastavu mora nalaziti minimalno 12% kroma [19]. Kada se u sastavu čelika nalazi barem 12% kroma, taj krom na površini u dodiru s kisikom stvara jako tanki sloj oksida – kromov oksid [25]. To je sloj koji je otporan na koroziju i štiti materijal od korozije. Štiti ga na način da ne dopušta vlazi i ostalim tvarima iz okoline pristup čeliku. Ponaša se kao pregrada, barijera između čelika i okoline. Ovaj sloj nazivamo pasivni film. Nastanak pasivnog filma možemo vidjeti na slici 14.



Slika 14.: Prikaz nastanka pasivnog filma [25]

Ako dođe do oštećenja pasivnog filma, npr. prilikom mehaničke strojne obrade, sloj će se sam obnoviti. Jedini preduvjet da bi se sloj sam obnovio jest da se čelik nalazi u području u kojem ima dovoljno kisika. Samoobnova će se dogoditi na način da će se na mjestu oštećenja pojaviti više kisika, koji će se formirati i koji će oporaviti oštećenu površinu [25]. Ako se nehrđajući čelik nalazi u okolišu u kojem ima malo, ili nimalo kisika, tada je i ova vrsta čelika

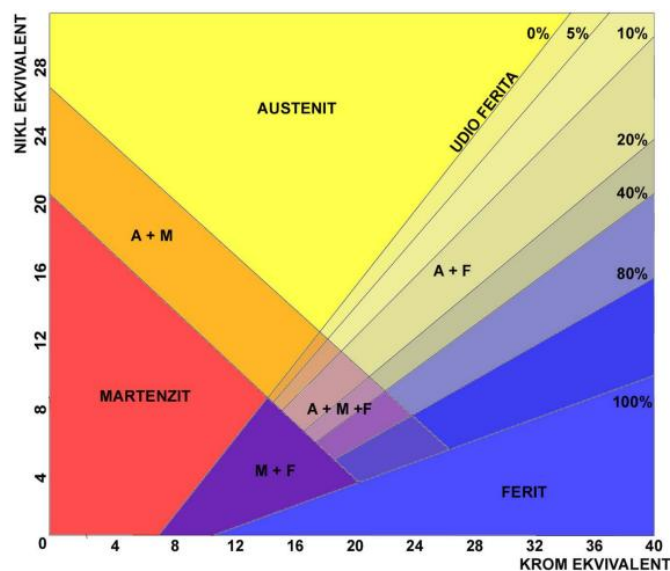
osjetljiva na korozijsko djelovanje. Obnavljanje nakon oštećenja sloja kromovih oksida možemo vidjeti na slici 15.



Slika 15.: Samoobnova sloja kromovih oksida [26]

3.2.1. Podjela i vrste nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici se dijele prema udjelima legirajućih elemenata u svome sastavu, odnosno dijele se prema nastaloj mikrostrukturi. Razlikujemo feritne, austenitne, dupleks (austenitno–feritne) i martenzitne nehrđajuće čelike [26]. Najbitniji legirajući elementi su krom i nikal, ali dodaju se i još neki drugi, kao što su aluminij, bakar, molibden, vanadij, volfram itd. Najbolji prikaz utjecaja udjela legirajućih elemenata kroma i nikla na mikrostrukturu nehrđajućih čelika, a samim time i na vrste podjele, je Schaefflerov dijagram. Ovaj dijagram možemo vidjeti na slici 16.



$$\text{KROM EKVALENT} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb$$

$$\text{NIKL EKVALENT} = \%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn$$

Slika 16.: Schaefflerov dijagram [26]

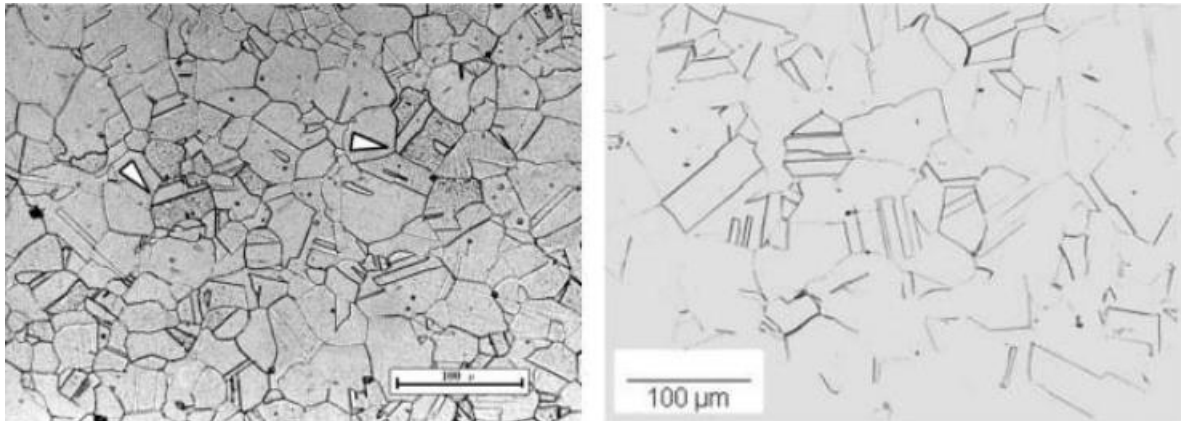
3.2.1.1. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici su najviše korištena vrsta nehrđajućih čelika. Razlog tome je što austenitni čelici imaju dobru korozijsku postojanost, dobru obradljivost, izvrsnu zavarljivost, izvrsna mehanička svojstva te dobre estetske karakteristike [26]. Iako su austenitni čelici skuplji od feritnih i martenzitnih, austenitni čelici se više koriste. Skuplji su zbog legirajućih elemenata u svome sastavu. Osim što su skuplji, bolji su i pouzdaniji su od ostalih pa je to i razlog zašto se više koriste. Austenitni nehrđajući čelici imaju široku primjenu. Ova vrsta čelika se koristi u gotovo svim granama industrije, u građevinarstvu, za izradu ukrasnih predmeta, kuhinjskih uređaja, medicinske opreme i sl [27].

Što se tiče mikrostrukture, austenitni nehrđajući čelici sadrže maksimalno 0,15% ugljika, iz razloga, što je manje ugljika to je otpornost na interkristalnu koroziju veća [28]. Nadalje, sadrže barem 18% kroma te barem 8% nikla. Krom i nikal su bitni zbog povećanja otpornosti na koroziju. Također, krom i nikal određuju austenitnu mikrostrukturu. Austenitni nehrđajući čelici se još legiraju s molibdenom, titanom i niobijem, jer ovi elementi djeluju stabilizirajuće na otpornost na interkristalnu koroziju. Još se mogu dodati i neki drugi elementi, kao npr. dušik, koji povećava čvrstoću i povećava otpornost na rupičastu koroziju. Maseni udjeli svih elemenata austenitnih nehrđajućih čelika dani su u tablici 7. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika može se vidjeti na slici 17.

Tablica 7.: Maseni udjeli elemenata u strukturi austenitnih nehrđajućih čelika [28]

Element	Maseni udio [%]
Ugljik	0,02 - 0,1 (<0,15)
Krom	18 - 26
Nikal	8 - 35
Mangan	1 - 2 (4 - 15,5)
Molibden	0 - 2
Dušik	0 - 0,15
Silicij	0,5 - 3
Titan i niobij	0 - 0,2



Slika 17.: Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [28]

Osnovni austenitni nehrđajući čelik je AISI 304 ili 18-8. To je željezna legura koja sadrži 18% kroma i 8,5% nikla i manje količine ugljika, dušika mangana i silicija [28]. Na osnovi ovog čelika, razvijeno je desetak novih legura, koje se razlikuju samo prema elementima koji se još dodaju, a to su npr. molibden, dušik. Primjer AISI 304 nehrđajućeg čelika vidimo na slici 18.



Slika 18.: Nehrđajući čelik AISI 304 [29]

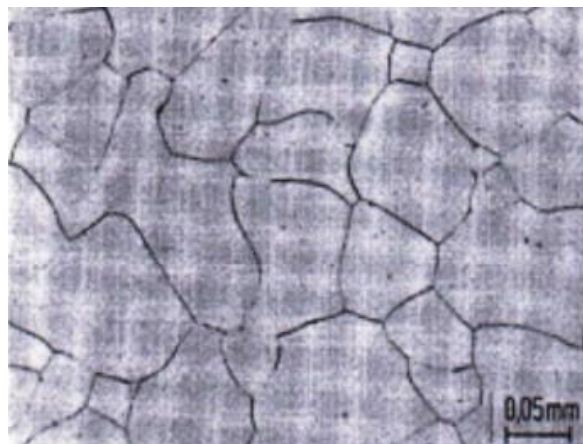
3.2.1.2. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici su čelici u čijoj se strukturi nalazi 11–17% kroma te se mogu pronaći i neki drugi legirajući elementi kao što su molibden, silicij, aluminij i sl. Udio ugljika, dušika i nikla, odnosno udio austenitizirajućih elemenata je jako mali. Feritni nehrđajući čelici prilikom postupaka toplinske obrade ne mogu očvrnuti jer nemaju faznu pretvorbu, a razlog tome je jako mali udio ugljika u strukturi (manje od 0,1%) [26]. Feritni nehrđajući čelici

su feromagnetični, odnosno pri svim temperaturama zadržavaju feritnu mikrostrukturu. Još neka svojstva feritnih nehrđajućih čelika su: relativno su mekani, skloni su pojavi krhkosti, imaju slabu deformabilnost, dodatkom molibdena povećava im se otpornost na rupičastu koroziju, čvrstoća pri visokim temperaturama im je manja nego kod austenitnih čelika, slabo su zavarljivi jer su skloni pogrubljenju zrna na visokim temperaturama [28].

S obzirom na to da su feritni nehrđajući čelici jedina vrsta nehrđajućih čelika koja u svojoj strukturi nema nikal (ili ga ima vrlo malo), a nikal je jedan od skupljih legirajućih elemenata, relativno su jeftini, odnosno najpovoljniji su nehrđajući čelici. Feritni čelici imaju bolju otpornost na koroziju i slabije oksidiraju u odnosu na austenitne čelike [28]. Nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije pa se ugrađuju u postrojenja u kojima se pojavljuje napetosna korozija, tamo gdje ne mogu zadovoljiti austenitni čelici [26]. Koriste se u prostorima za proizvodnju dušične kiseline, prilikom obrade vode, prerade hrane, u pivovarama, za izradu dijelova kućanskih aparata i sl.

Feritni čelici poboljšanih svojstava nazivaju se superferitni nehrđajući čelici. Superferitni čelici imaju povišen udio kroma, od 19–30%, dodatno su legirani molibdenom i imaju niski udio ugljika i dušika. Ovi čelici imaju bolju zavarljivost i bolju otpornost na koroziju [25].

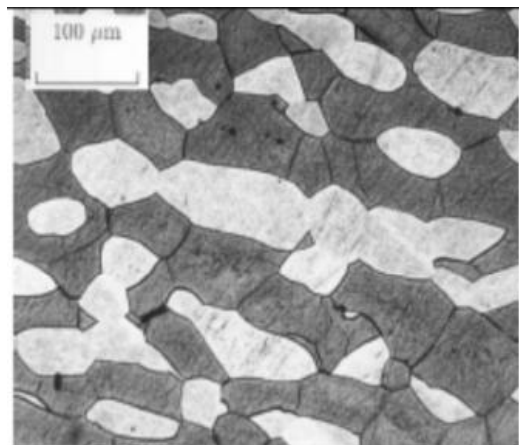


Slika 19.: Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [26]

3.2.1.3. Dupleks (austenitno-feritni) nehrđajući čelici

Dupleks nehrđajući čelici imaju dvofaznu mikrostrukturu. Njihova se mikrostruktura sastoji od austenita i ferita, čiji je odnos 50:50 [26]. U strukturi dupleks čelika se nalazi 22–24% kroma i 6–8% nikla. Ovaj čelik zadržava svoju podjednaku (50:50) dvofaznu mikrostrukturu do temperature 500 °C, međutim iznad ove temperature, udio ferita se počne povećavati

te pri temperaturi od 1350 °C, ovaj čelik postaje jednofazan, odnosno njegova se mikrostruktura sastoji samo od ferita i onda čelik postaje krhak. Zbog ovoga razloga ova vrsta čelika ima problema sa zavarivanjem. Temperatura primjene dupleks čelika je između -50 i 350 °C [28]. Međutim ovi čelici imaju odličnu korozivsku postojanost i imaju dobra mehanička svojstva. Dupleks čelici imaju višu granicu razvlačenja i tvrdoću nego austenitni čelici. Također imaju i veću otpornost na opću i rupičastu koroziju nego austenitni čelici i imaju veliku otpornost na napetosnu koroziju. Dupleks čelici se najčešće koriste u industriji nafte i plina (crpke, destilatori, cjevovodi, pumpe...), kemijsko–procesnoj industriji, industriji papira, brodogradnji (osovina propela, kormila, crpke, ležajevi), petrokemijskoj industriji, transportu (cisterne).



Slika 20.: Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [26]

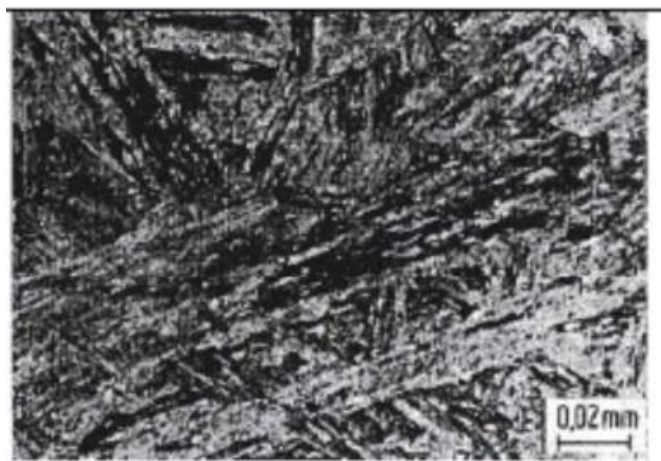
3.2.1.4. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici u svojoj strukturi imaju 11-13% kroma, i do 1,2% ugljika [26]. Prema sastavu su jako slični feritnim nehrđajućim čelicima, glavna razlika je što martenzitni čelici sadrže manji udio kroma i veći udio ugljika. Feromagnetični su i mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade. Da bi se povećala otpornost na koroziju, dodaju se male količine nikla (do 2,5%), a sumpor se dodaje da bi se povećala obradivost. Zbog malog udjela kroma i nikla ovi čelici imaju manju otpornost na koroziju, ali imaju veću čvrstoću i tvrdoću, pa se ovi čelici koriste u sredinama koje zahtijevaju veću tvrdoću i čvrstoću te manju korozivsku postojanost. Glavni nedostatak im je osjetljivost prema vodikovoj krhkosti, posebno u sulfidnim okolišima. Nedostatak im je i što su pri niskim temperaturama jako osjetljivi na udarni lom. Prednosti su im što imaju višu tvrdoću, čvrstoću te otpornost na

trošenje nego austenitni i feritni čelici, i imaju poboljšanu granicu razvlačenja i otpor puzanju pri povećanim temperaturama [28].

Martenzitne nehrđajuće čelike možemo podijeliti u dvije podskupine: konstrukcijski i alatni [28]. Konstrukcijski sadrže do 0,25% ugljika i kod ove skupine se pažnja usmjerava prema otpornosti na koroziju. Alatni sadrže >0,3% ugljika, veći postotak ugljika povećava otpornost na trošenje.

Ova vrsta nehrđajućih čelika se koristi za izradu lopatica turbina, mjernih alata, kotrljajućih ležajeva, oštrica noževa, valjaka u proizvodnji papira, dijelova za rad na visokim temperaturama [26].



Slika 21.: Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [26]

3.2.2. Trajnost i primjena nehrđajućih čelika

Postoji nekoliko vrsta nehrđajućih čelika i nekoliko vrsta okoliša u kojem se oni mogu nalaziti. Svaka vrsta se drukčije ponaša u drukčijem okolišu. Stoga ovisno o okolišu potrebno je odabrati najprikladniju vrstu nehrđajućeg čelika za taj okoliš. Osim okoliša u kojem se čelik primjenjuje, u obzir treba uzeti i način proizvodnje, prikladnost za strojnu obradu, površinsku obradu i održavanje konstrukcije [30]. Očekivani uporabni vijek za nehrđajuće čelike određen je početnim odabirom materijala, a ne naknadnom zaštitnom obradom.

Prvi korak prilikom odabira materijala je određivanje osobina uporabnog okoliša. Drugi korak je određivanje utjecaja neposredne okoline na čelik, odnosno treba voditi računa o elementima i tvarima s kojima će čelik vjerojatno doći u kontakt. Nakon toga treba voditi računa o mehaničkim osobinama i učincima vrsta opterećenja. Pri konačnom odabiru u obzir se mogu uzeti jednostavnost proizvodnje, dostupnost materijala, površinska obrada i

troškovi [30]. Prikladnost kvalitete čelika u okolišnim uvjetima, temeljena na iskustvima u sličnim primjenama dana je u tablici 8. Iz te tablice je vidljivo da su u ruralnom okolišu najbolji izbor čelici kvalitete 1.4301, 1.4311, 1.4541 i 1.4318. Navedene kvalitete čelika su najbolji izbor i u urbanim sredinama gdje je korozija kategorizirana kao mala i srednja, a u urbanim sredinama gdje je korozija kategorizirana kao velika, najbolji izbor su čelici kvalitete 1.4362, 1.4401, 1.4404, 1.4406 i 1.4571. Navedene kvalitete su najbolji izbor i u industrijskim i morskim okolišima gdje je korozija kategorizirana kao mala i srednja. U industrijskim i morskim okolišima gdje je korozija kategorizirana kao velika najbolji izbor su čelici kvalitete 1.4439, 1.4462, 1.4529 i 1.4539.

Tablica 8.: Predložene kvalitete nehrđajućeg čelika za primjenu u okolišu [30]

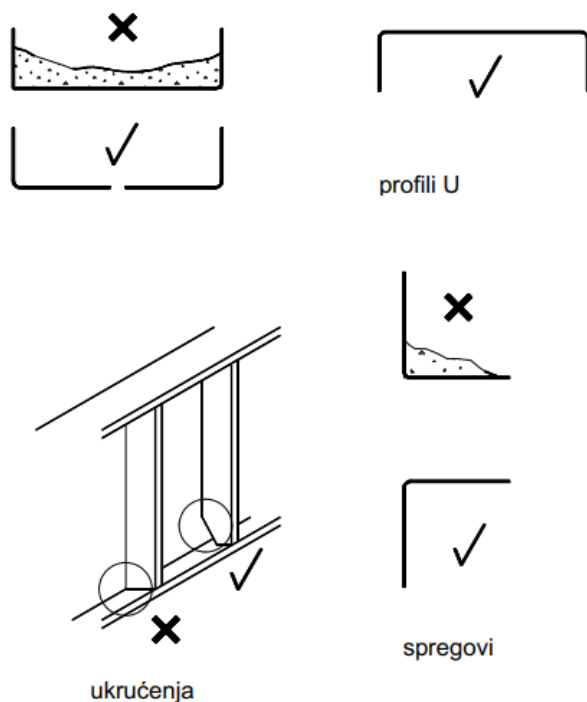
Kvaliteta čelika prema normi EN 10088	Vrsta okoliša i kategorija korozije											
	Ruralni			Urbani			Industrijski			Morski		
	mala	srednja	velika	mala	srednja	velika	mala	srednja	velika	mala	srednja	velika
1.4003 1.4016	Y ^l	X	X	Y ^l	X	X	X	X	X	X	X	X
1.4301 1.4311 1.4541 1.4318	Y	Y	Y	Y	Y	(Y)	(Y)	(Y)	X	Y	(Y)	X
1.4362 1.4401 1.4404 1.4406 1.4571	O	O	O	O	Y	Y	Y	Y	(Y)	Y	Y	(Y)
1.4439 1.4462 1.4529 1.4539	O	O	O	O	O	O	O	O	Y	O	O	Y

Uvjeti za koroziju:
Mali: Najmanje korozivni uvjeti za tu vrstu okoliša, primjerice slučajevi ublaženi malom vlažnošću ili niskom temperaturom.
Srednji: Tipični za ovu vrstu okoliša.
Veliki: Korozija će vjerojatno biti veća od prosjeka te vrste okoliša, na primjer, povećana je zbog stalne velike vlažnosti, visokih temperatura okoline ili posebno agresivnih onečišćivača zraka.

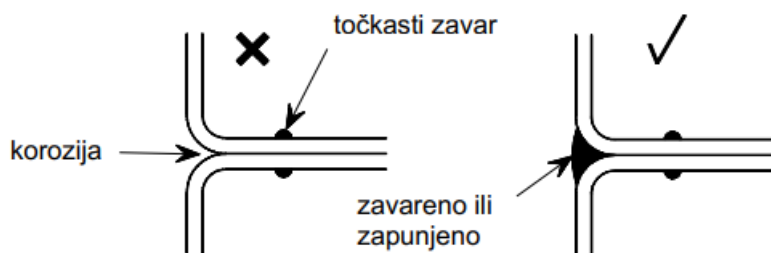
Legenda:
O možda prezahtjevno sa stajališta korozije
Y vjerojatno najbolji izbor za otpornost na koroziju i cijenu
Y^l samo za unutarnje primjene; treba izbjegavati upotrebu feritnih nehrđajućih čelika za dekorativne primjene
X vjerojatno podložan prekomjernoj koroziji
(Y) vrijedan razmatranja pod uvjetom da su poduzete pogodne mjere predostrožnosti [tj. propisati razmjerno glatku površinu i provoditi redovito čišćenje].

Najvažniji korak u sprječavanju problema korozije je odabir prikladnog materijala. Međutim treba voditi računa i o drugim stvarima. Treba izbjegavati nakupljanje nečistoća. To se postiže tako da se kutni i U profili usmjere tako da nakupljanje nečistoća bude najmanje moguće [30]. Također treba predvidjeti rupe za odvodnju i izbjegavati horizontalne površine. Treba i izbjegavati procjepe, odnosno koristiti zavarene umjesto vijčanih spojeva,

upotrebljavati zatvorene zavare i sl. Zavare treba uvijek čistiti kako bi se obnovila otpornost na koroziju. Potrebno je i smanjiti vjerojatnost galvanske korozije, što se postiže električnom zaštitom, pravilnom uporabom boja i skraćivanjem razdoblja vlaženja. Izbjegavanje nakupljanja nečistoća možemo vidjeti na slici 22. Izbjegavanje procjepa vidimo na slici 23.



Slika 22.: Izbjegavanje nakupljanja nečistoća [30]



Slika 23.: Izbjegavanje procjepa [30]

I prilikom odabira vijaka vrijedi sve što je gore navedeno za odabir materijala nehrđajućih čelika. Razlikujemo 5 kvaliteta vijaka i to su: A1, A2, A3, A4 i A5. Kvaliteta A1 ima manju otpornost na koroziju i ne upotrebljava se. Sa stajališta otpornosti na koroziju kvaliteta A2 je istovrijedna s kvalitetom 1.4301, kvaliteta A3 s 1.4541, A4 s 1.4401 i 1.4404, i kvaliteta A5 s 1.4571. Treba paziti prilikom korištenja strojno obrađenih nehrđajućih čelika koji se koriste za spajala, jer dodatak sumpora u njihovom sastavu ih čini sklonijima na koroziju.

4. NEHRĐAJUĆI I OBIČNI ČELICI – RAZLIKE PRORAČUNA PREMA EC3

Razlika između nehrđajućih čelika i običnih čelika je u njihovom kemijskom sastavu. Nehrđajući čelici u svome sastavu imaju određene legirajuće i prateće elemente, koje obični čelici nemaju. Zbog tih legirajućih i pratećih elemenata nehrđajući čelici imaju drukčije mehaničke osobine. Zbog drukčijih mehaničkih osobina i proračun je drukčiji. Glavne razlike u proračunu ćemo vidjeti u nastavku ovoga poglavlja.



Slika 24.: Primjer izgleda nehrđajućeg i običnog čelika [31]

Proračun građevnih konstrukcija se radi prema Eurokodu. Eurokod je skup europskih pravila i normi vezanih uz projektiranje. EN 1993: Eurokod 3 je naziv za normu vezanu uz projektiranje čeličnih konstrukcija. EN 1993 se sastoji od više dijelova, među kojima su i pravila za proračun običnih i nehrđajućih čelika. EN 1993-1-4 je dio te norme. U njemu su dana pravila za proračun nehrđajućih čelika. Odredbe dane u normi EN 1993-1-4 se primjenjuju samo za proračun austenitnih, austenitno-feritnih i feritnih nehrđajućih čelika i primjenjuju se na materijale s nazivnom granicom popuštanja f_y do zaključno 480 N/mm^2 [30]. Ovisno o vrsti, kvaliteti nehrđajućeg čelika, nazivnoj debljini t i obliku proizvoda razlikuju se i granice popuštanja f_y i vlačne čvrstoće f_u , s kojima se ulazi u proračunu. Tablica s tim podacima dana je u normi EN 10088 i prikazana je kao tablica 9. Nazivne vrijednosti iz te tablice su karakteristične vrijednosti.

Tablica 9.: Nazivne vrijednosti granice popuštanja i vlačne čvrstoće za konstrukcijske nehrđajuće čelike prema normi EN 10088 [30]

Vrsta nehrđajućeg čelika	Kvalitet a	Oblik proizvoda							
		Hladno valjani trak		Toplo valjani trak		Toplo valjana ploča		Šipke i profili	
		Nazivna debljina t							
		t ≤ 6 mm		t ≤ 12 mm		t ≤ 75 mm		t ≤ 250 mm	
		f _y	f _u	f _y	f _u	f _y	f _u	f _y	f _u
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
feritni čelici	1.4003	280	450	280	450	250 ³⁾	450 ³⁾	260 ⁴⁾	450 ⁴⁾
	1.4016	260	450	240	450	240 ³⁾	430 ³⁾	240 ⁴⁾	400 ⁴⁾
	1.4512	210	380	210	380	-	-	-	-
austenitni čelici	1.4306	220	520	200	520	200	500	180	460
	1.4307							175	450
	1.4541								
	1.4301	230	540	210	520	210	520	190	500
	1.4401	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4404							230	530
	1.4539								
	1.4571		540		540				
	1.4432							200	500
	1.4435	240	550	220	550	220	550		
	1.4311	290	550	270	550	270	550	270	550
	1.4406	300	580	280	580	280	580	280	580
	1.4439	290		270		270			
	1.4529	300		300		300			
	1.4547	320	650	300	650	300	650	300	650
1.4318	350	650	330	650	330	630	-	-	
austenitno-feritni čelici	1.4362	420	600	400	600	400	630	400 ²⁾	600 ²⁾
	1.4462	480	660	460	660	460	640	450	650

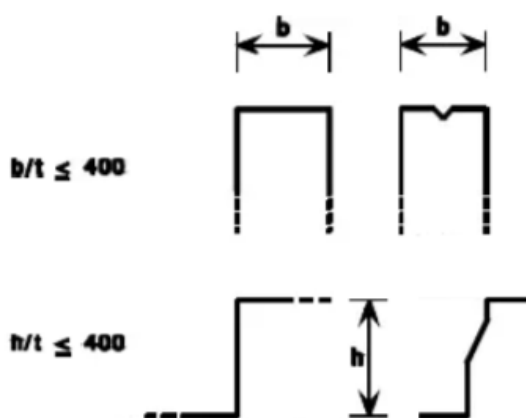
¹⁾Nazivne vrijednosti f_y i f_u u ovoj tablici smiju se primijeniti u proračunu ne uzimajući u obzir učinke anizotropije ili očvršćivanja.
²⁾t ≤ 160mm
³⁾t ≤ 25mm
⁴⁾t ≤ 100mm

Ovisno o vrsti i kvaliteti nehrđajućeg čelika, koriste se različite pretpostavljene vrijednosti modula elastičnosti E. Za austenitne i austenitno-feritne čelike iz prethodne tablice koristi se modul elastičnosti $E = 200\,000\text{ N/mm}^2$ s iznimkom za kvalitete 1.4539, 1.4529 i 1.4547. Za navedene austenitne čelike proračun se radi s modulom elastičnosti $E = 195\,000\text{ N/mm}^2$. Za sve feritne čelike iz tablice se koristi $E = 220\,000\text{ N/mm}^2$ [30].

4.1. Klasifikacija poprečnog presjeka

Prilikom proračuna otpornosti poprečnih presjeka i elemenata u čeličnim konstrukcijama - dimenzioniranja, jako bitna stvar, a ujedno i prva koju određujemo je klasifikacija poprečnog presjeka. Klasa poprečnog presjeka nam govori na koji ćemo način provoditi proračun, odnosno koju ćemo teoriju (elastičnosti ili plastičnosti) koristiti prilikom dimenzioniranja i proračuna unutarnjih sila. Razlikujemo 4 klase poprečnog presjeka. Klasa 4 je najlošija klasa poprečnog presjeka. Kada poprečni presjek ne zadovoljava uvjete prve tri klase, svrstamo ga u posljednju, 4. klasu. Klasa 4 se neće proučavati u ovome radu.

Prilikom klasifikacije poprečnog presjeka promatramo odnos širine i debljine, odnosno vitkost i onda tu vitkost uspoređujemo s određenim uvjetom, koji ona mora zadovoljiti da bi upala u određenu klasu. Da bi koristili normu za proračun nehrđajućih čelika, taj odnos širine i debljine b/t i h/t ne bi trebao biti veći od 400 [30]. Iznimka je ako je vizualno krivljenje ravnih dijelova poprečnog presjeka neprihvatljivo za uporabno opterećenje, onda se primjenjuje granica $b/t \leq 75$.



Slika 25. Najveći omjer širine i debljine [30]

Prva razlika kod klasifikacije poprečnog presjeka je prilikom izračuna epsilon (ϵ). Epsilon (ϵ) je faktor koji je ovisan o kvaliteti čelika. Kod običnih čelika epsilon se računa izrazom [32]:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (1)$$

gdje je f_y – granica popuštanja čelika.

Kod nehrđajućih čelika epsilon se računa izrazom [30]:

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \times \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} \quad (2)$$

Nadalje prilikom klasifikacije poprečnog presjeka za isti poprečni presjek, za čelike s istom granicom popuštanja- f_y , klasifikacija kod nehrđajućih čelika je „stroža“. Prilikom klasifikacije poprečnog presjeka unutarnjeg tlačnog elementa (hrpta) za klasu 1, uvjet kod nehrđajućih čelika je oko 20% nepovoljniji u odnosu na uvjet kod običnih čelika. Za klase 2 i 3, taj postotak nepovoljnosti raste i do 40%. Prilikom klasifikacije vanjskog tlačnog elementa (pojasnice) kod nehrđajućih čelika, treba paziti da li se radi o hladno oblikovanom elementu ili o zavarenom elementu, jer su uvjeti drugačiji, dok kod običnih čelika postoji samo jedan uvjet [30]. Kod klase 1, uvjet za zavarene nehrđajuće čelike je isti kao i uvjet za obične čelike, dok je uvjet za hladno oblikovane nehrđajuće čelike oko 10% povoljniji u odnosu na taj uvjet. Uvjet za klasu 2 je najnepovoljniji za zavarene nehrđajuće čelike, malo povoljniji za obične čelike i najpovoljniji za hladno oblikovane nehrđajuće čelike. Za klasu 3 oba uvjeta za nehrđajuće čelike su nepovoljnija od uvjeta za obične čelike.

Postoji razlika i prilikom klasifikacije kutnika. Kutnici ne mogu biti klasa 1 i 2. A uvjet za klasu 3 je 20% nepovoljniji za nehrđajuće čelike. Prilikom klasifikacije cijevnih profila, kod nehrđajućih čelika uvjeti se razlikuju, ovisno je li element napregnut savijanjem ili tlakom, dok kod običnih to nije bitno, uvjet je samo jedan. Klasifikacija nehrđajućih cijevnih profila napregnutih tlakom je jednaka kao i klasifikacija običnih čelika. Jedina razlika kod klasifikacije nehrđajućih profila napregnutih savijanje u odnosu na obične čelike je kod klase 3. Ona je oko 68% nepovoljnija za obične čelike. Bitno je naglasiti da norma kod nehrđajućih čelika napregnutih savijanjem vrijedi za savijane profile najviše do 240 CHS [30].

Da bi „upali“ u određenu klasu poprečnog presjeka, obični čelici uglavnom mogu imati veću lokalnu vitkost dijela poprečnog presjeka nego je to slučaj kod nehrđajućih čelika. Odnosno za istu debljinu t , obični čelici mogu imati veću visinu hrpta/ širinu pojasnice nego nehrđajući čelik.

4.2. Parcijalni koeficijenti sigurnosti

Prilikom svakog proračuna u građevinarstvu, cilj je biti na strani sigurnosti. To se postiže tako da se u proračun ide sa smanjenim vrijednostima, npr. neke otpornosti, čvrstoće i sl.

Smanjenje tih vrijednosti se postiže tako da se karakteristična vrijednost podijeli s odgovarajućim koeficijentom sigurnosti. I s tom umanjenom, proračunskom vrijednosti idemo u proračun. Tako smo na strani sigurnosti prilikom proračuna. Upravo ti parcijalni koeficijenti sigurnosti su sljedeća razlika u proračunu običnih i nehrđajućih čelika.

Kod običnih čelika vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilikom proračuna su [32]:

$\gamma_{m0} = 1,0$ – otpornost poprečnog presjeka bilo koje klase

$\gamma_{m1} = 1,1$ – otpornost elementa na nestabilnost ocijenjenu kontrolama elementa

$\gamma_{m2} = 1,25$ – otpornost vlačno napregnutih poprečnih presjeka na lom

Kod nehrđajućih čelika vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilikom proračuna su [30]:

$\gamma_{m0} = 1,1$ – otpornost presjeka na prekomjerno popuštanje uključujući izbočivanje

$\gamma_{m1} = 1,1$ – otpornost elementa na nestabilnost ocijenjenu kontrolama elementa

$\gamma_{m2} = 1,25$ – otpornost vlačno napregnutih poprečnih presjeka na lom

Vidimo da prilikom proračuna, kod nehrđajućih čelika se koriste veći ili jednaki parcijalni koeficijenti sigurnosti.

4.3. Granično stanje nosivosti

4.3.1. Vlačna otpornost u rupama za vijke

Razlika u ovom dijelu proračuna je prilikom određivanje proračunske vlačne otpornosti poprečnog presjeka. Kao vrijednost vlačne otpornosti poprečnog presjeka kod nehrđajućih čelika se uzima manja vrijednost između proračunske plastične otpornosti bruto poprečnog presjeka i krajnje otpornosti neto poprečnog presjeka [30]. Proračunska plastična otpornost bruto poprečnog presjeka se računa kao i kod običnih čelika, prema izrazu:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{m0}} \quad (3)$$

Razlika prilikom proračuna ove otpornosti je u faktoru γ_{m0} . Kod običnih čelika on iznosi 1, a kod nehrđajućih 1,1.

Krajnja otpornost neto poprečnog presjeka nehrđajućih čelika se određuje iz izraza:

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{m2}} \quad (4)$$

gdje je:

$$k_r - (1 + 3r(d_0/u - 0,3)) \leq 1$$

r - (broj vijaka u poprečnom presjeku)/(ukupni broj vijaka u spoju)

$$u = 2e_2, u \leq p_2$$

A_{net} – ploština neto poprečnog presjeka

f_u - vlačna čvrstoća čelika

d_0 – nazivni promjer rupe za vijak

e_2 – udaljenost do ruba od središta rupe za vijak do susjednog ruba u smjeru okomitom na smjer prijenosa opterećenja

p_2 – razmak između središta rupa za vijake u smjeru okomitome na smjer prijenosa opterećenja [30].

4.3.2. Posmik

Prva razlika u ovom dijelu je kada se određuje treba li vršiti provjeru elementa na posmično izvijanje. Uvjet kod nehrđajućih čelika za neukrućen hrbat je [30]:

$$\frac{h_w}{t} > \frac{52}{\eta} \times \varepsilon \quad (5)$$

i za ukrućen hrbat je:

$$\frac{h_w}{t} > \frac{23}{\eta} \times \varepsilon \times \sqrt{k_\tau} \quad (6)$$

gdje je:

h_w – svijetla visina hrpta između pojasnica

t – debljina elementa

k_τ – koeficijent najmanjeg posmičnog izvijanja

η – faktor koji se određuje prema normi HRN EN 1993-1-5.

Ako je zadovoljen jedan od ovih uvjeta, treba kontrolirati otpornost na posmično izvijanje i treba osigurati poprečna ukrućenja na osloncima.

Druga razlika prilikom provjere na posmik je prilikom određivanja faktora doprinosa hrpta otpornosti na posmično izvijanje, w . Faktor doprinosa računamo za hrptove s poprečnim ukrućenjima samo na osloncima i za hrptove koji imaju ili poprečna ili uzdužna međuukrućenja ili oboje [30].

Kod nehrđajućih čelika taj faktor se određuje:

$$\chi_w = \eta \quad \text{za} \quad \bar{\lambda}_w \leq \frac{0,6}{\eta} \quad (7)$$

$$\chi_w = 0,11 + \frac{0,64}{\bar{\lambda}_w} - \frac{0,05}{\bar{\lambda}_w^2} \quad \text{za} \quad \bar{\lambda}_w > \frac{0,6}{\eta} \quad (8)$$

gdje se vitkost $\bar{\lambda}_w$ računa iz izraza:

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \times \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}} \quad (9)$$

gdje je:

τ_{cr} – posmično naprezanje hrpta

f_{yw} – granica popuštanja hrpta.

Posljednja razlika prilikom provjere na posmik je kod određivanja faktora doprinosa pojasnice. Jedina razlika prilikom određivanja faktora doprinosa pojasnice je kod računanja vrijednosti razmaka između plastičnih zglobova na pojasnici, c. Kod nehrđajućih čelika se računa izrazom [30]:

$$c = a \times \left(0,17 + \frac{3,5 \times b_f \times t_f^2 \times f_{yf}}{t_w \times h_w^2 \times f_{yw}} \right) \text{ i } \frac{c}{a} \leq 0,65 \quad (10)$$

gdje je:

a – udaljenost između poprečnih ukrućenja

b_f – širina pojasnice

t_f – debljina pojasnice

f_{yf} – granica popuštanja pojasnice

t_w – debljina hrpta

h_w – visina hrpta

4.3.3. Proračun elemenata jednolikog poprečnog presjeka napregnutih tlakom

Glavna razlika u ovom dijelu proračuna između običnih i nehrđajućih čelika je prilikom određivanja krivulje izvijanja.

Kod nehrđajućih čelika za elemente napregnute osnim tlakom, vrijednost χ za prikladnu bezdimenzijsku vitkost $\bar{\lambda}$ određuje se iz odgovarajuće krivulje izvijanja izrazom [30]:

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (11)$$

gdje je:

$$\phi = 0,5 \times (1 + \alpha \times (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) \quad (12)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} \text{ za 1., 2., 3. razred poprečnih presjeka} \quad (13)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_y}{N_{cr}}} \text{ za 4. razred poprečnih presjeka} \quad (14)$$

α – faktor nesavršenosti

N_{cr} – elastična kritična sila za odgovarajući oblik izvijanja utemeljena na svojstvima bruto poprečnog presjeka

$\bar{\lambda}_0$ - granična vitkost.

Vrijednosti za α i $\bar{\lambda}_0$ koje odgovaraju odgovarajućim krivuljama izvijanja određuju se iz sljedeće tablice, uz napomenu da se krivulje izvijanja u tablici ne primjenjuju na šuplje profile koji su nakon proizvodnje žareni [30].

Tablica 10.- Vrijednosti α i $\bar{\lambda}_0$ za izvijanje uz savijanje, torzijsko izvijanje i torzijsko izvijanje uz savijanje [30]

Oblik izvijanja	Vrsta elementa	α	$\bar{\lambda}_0$
uz savijanje	hladno oblikovani otvoreni profili	0,49	0,40
	šuplji profili (zavareni i bešavni)	0,49	0,40
	zavareni otvoreni profili (jača os)	0,49	0,20
	zavareni otvoreni profili (slabija os)	0,76	0,20
torzijsko i torzijsko uz savijanje	svi elementi	0,34	0,20

4.3.4. Proračun elemenata jednolikog poprečnog presjeka napregnutih savijanjem

U ovom dijelu proračuna razlika je prilikom izračuna vrijednosti χ_{LT} za odgovarajuću bezdimenzijsku vitkost $\bar{\lambda}_{LT}$.

Kod nehrđajućih čelika, za elemente stalnog poprečnog presjeka napregnute savijanjem vrijednost χ_{LT} za odgovarajuću bezdimenzijsku vitkost $\bar{\lambda}_{LT}$ određuje se iz izraza [30]:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (15)$$

gdje je:

$$\phi_{LT} = 0,5 \times (1 + \alpha_{LT} \times (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2) \quad (16)$$

α_{LT} – faktor nesavršenosti

= 0,34 za hladno oblikovane profile i šuplje profile (zavarene i bešavne)

= 0,76 za zavarene otvorene profile i druge profile za koje nema dostupnih podataka o ispitivanju.

4.3.5. Proračun elemenata jednolikog poprečnog presjeka napregnutih savijanjem i osnim tlakom

Kod nehrđajućih čelika prilikom proračuna elemenata koji su izloženi kombiniranom savijanju i osnom tlaku, treba zadovoljiti sljedeći izraz [30]:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \times \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \times e_{Ny}}{\beta_{W,y} \times W_{pl,y} \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + k_z \times \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \times e_{Nz}}{\beta_{W,z} \times W_{pl,z} \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (17)$$

gdje su:

e_{Ny} , e_{Nz} – pomaci u neutralnim osima kad je poprečni presjek napregnut jednolikim tlakom

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ – proračunske vrijednosti tlačne sile i najvećih momenata oko osi y-y i z-z uzduž elementa

$(N_{b,Rd})_{min}$ – najmanja vrijednost $N_{b,Rd}$ za sljedeća četiri oblika izvijanja: izvijanje uz savijanje oko osi y, izvijanje uz savijanje oko osi z, torzijsko izvijanje oko osi y i torzijsko izvijanje uz savijanje

$\beta_{W,y}$, $\beta_{W,z}$ – vrijednost β_W određene za osi y i z, gdje je

$\beta_W = 0$, za 1. ili 2.razred poprečnih presjeka

$\beta_W = W_{el} / W_{pl}$ za 3.razred poprečnih presjeka

$\beta_W = W_{eff} / W_{pl}$ za 4.razred poprečnih presjeka

$W_{pl,y}$, $W_{pl,z}$ – plastični momenti otpora za osi y i z

k_y , k_z – faktori međudjelovanja.

4.4. Granično stanje uporabljivosti

Prilikom procjene progiba treba uzeti u obzir učinke nelinearnog ponašanja krivulje naprezanja – deformacija nehrđajućih čelika i učinkovitost poprečnog presjeka.

Jedina razlika u ovom dijelu proračuna je što se progibi proračunavaju sa sekantnim modulom elastičnosti $E_{s,ser}$, koji je određen uzimajući u obzir naprezanja u elementu zbog kombinacije opterećenja za odgovarajuće granično stanje uporabljivosti i smjer valjanja [30]. Vrijednost sekantnog modula elastičnosti se određuje iz izraza:

$$E_{s,ser} = \frac{(E_{s,1} + E_{s,2})}{2} \quad (18)$$

gdje je:

$E_{s,1}$ – sekantni modul koji odgovara naprezanju σ_1 u vlačnoj pojasnici

$E_{s,2}$ – sekantni modul koji odgovara naprezanju σ_2 u tlačnoj pojasnici

Vrijednost $E_{s,1}$ i $E_{s,2}$ za odgovarajuće uporabno proračunsko naprezanje $\sigma_{i,Ed,ser}$ i smjer valjanja određuju se iz izraza:

$$E_{s,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \times \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \times \left(\frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y}\right)^n} \quad (19)$$

gdje je:

$\sigma_{i,Ed,ser}$ – proračunsko naprezanje u graničnom stanju uporabljivosti

$i = 1$ ili 2

n - koeficijent koji se određuje iz tablice 11.

Tablica 11.: Vrijednost za n [30]

Kvaliteta čelika	Faktor n	
	Uzdužni smjer	Poprečni smjer
1.4003	7	11
1.4016	6	14
1.4512	9	16
1.4301	6	8
1.4306		
1.4307		
1.4318		
1.4541		
1.4401	7	9
1.4404		
1.4432		
1.4435		
1.4539		
1.4571		
1.4462	5	5
1.4362		

4.5. Proračun spojeva – vijčani spojevi

Nehrđajući vijci i matice koje se koriste trebaju biti u skladu s normama EN ISO 3506-1, -2, -3. Podložne pločice moraju biti od nehrđajućeg čelika, u skladu s normom EN ISO 7089 ili EN ISO 7090. Otpornost na koroziju vijaka koji se koriste mora biti veća ili jednaka otpornosti na koroziju osnovnog materijala. Vrijednosti nazivne granice popuštanja f_{yb} i vlačne čvrstoće f_{ub} vijaka od nehrđajućeg čelika, s kojima se ulazi u proračun, ovise o razredu svojstava prema normi EN ISO 3506 i rasponu veličina, i uzimaju se iz sljedeće tftablice [30].

Tablica 12.: Nazivne vrijednosti za f_{yb} i f_{ub} nehrđajućih čeličnih vijaka [30]

Skupine materijala	Razred svojstava prema normi EN ISO 3506	Raspon veličina	Granica popuštanja f_{yb} , [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća f_{ub} , [N/mm ²]
austenitni i austenitno-feritni	50	≤ M 39	210	500
	70	≤ M 24	450	700
	80	≤ M 24	600	800

Prva razlika u ovom dijelu proračuna je što se prilikom provjere nosivosti vijka koristi se smanjena vrijednost vlačne čvrstoće vijka i ona se računa izrazom:

$$f_{u,red} = 0,5 \times f_y + 0,6 \times f_u \quad (20)$$

Smanjena vrijednost vlačne čvrstoće vijka mora biti manja ili jednaka vlačnoj čvrstoći vijka.

Druga razlika u ovom dijelu proračuna je prilikom provjere na posmičnu otpornost vijka. Posmična otpornost vijka se određuje iz izraza:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha \times f_{ub} \times A}{\gamma_{m2}} \quad (21)$$

gdje je:

A – ploština bruto poprečnog presjeka vijka (ako posmična ravnina kroz vijak prolazi dijelom bez nareza); ili vlačno napregnuta ploština vijka (ako posmična ravnina kroz vijak prolazi dijelom s narezom)

$\alpha = 0,6$ – ako posmična ravnina kroz vijak prolazi dijelom bez nareza

$\alpha = 0,5$ – ako posmična ravnina kroz vijak prolazi dijelom s narezom.

5. ZAKLJUČAK

Čelik je jedan od najkorištenijih i najvažnijih materijala na svijetu. I zato zaslužuje posebnu pozornost. Tijekom svog životnog vijeka čelik je izložen djelovanju prirodnih pojava i procesa. Najnegativnija pojava je korozija. Korozija uništava materijal i negativno utječe na mehaničke osobine materijala. Stoga je potrebno spriječiti koroziju da ne uništi naš materijal. Spriječiti koroziju možemo ili korištenjem zaštite od korozije prilikom korištenja običnih čelika, ili možemo koristiti čelike koji nisu osjetljivi na djelovanje korozije. Vrste čelika koje nisu osjetljive na djelovanje korozije su nehrđajući čelici i čelici otporni na koroziju. Ove vrste čelika zbog raznih legirajućih i pratećih elemenata u svome sastavu ostvaraju otpornost na koroziju. Upravo zbog tih elemenata, koji im daju otpornost na koroziju, smanjene su im neke druge mehaničke osobine. Prilikom projektiranja čeličnih konstrukcija prema Eurokodu 3, postoje razlike u projektiranju nehrđajućih i običnih čelika, zbog čega je specifičnost njihovog proračuna dana u zasebnom dijelu norme reda EN 1993, tj. u dijelu EN 1993-1-4.

POPIS LITERATURE

- [1] B. Androić, D. Dujmović, I. Džeba, Metalne konstrukcije 1, Institut građevinarstva Hrvatske, 1994.
- [2] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. -2024. Dostupno: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/korozija> (Pristupljeno: 10. 07. 2024.)
- [3] Koren D., Osnove korozije i zaštita konstrukcije primjenom premaza. Završni rad. Varaždin: Odjel za Proizvodno strojarstvo, Sveučilište Sjever; 2016.
- [4] Škuflić Chiara, Korozija i zaštita konstrukcije broda. Završni rad. Pula: Istarsko veleučilište, Università Istriana di scienze applicate; 2021.
- [5] Pačarek G., Laboratorijsko ispitivanje djelotvornosti lakohlapljivih inhibitora korozije. Diplomski rad. Slavonski brod : Strojarski fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku; 2014.
- [6] Andrić I., Korozija i zaštita od korozije poljoprivredne tehnike. Diplomski rad. Osijek: Poljoprivredni fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku; 2017.
- [7] Krčelić B., Napetostna korozija metala i metalnih legura. Završni rad. Zagreb: Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu; 2019.
- [8] Puntomarineri. Elektrokemijska korozija i zaštita od nje. [19.06.2019.], Dostupno: <https://hr.puntomarineri.com/electrochemical-corrosion-and-protection-against> (Pristupljeno: 01.02.2025.)
- [9] Jelić Mrčelić G., Korozija i zaštita materijala, nastavni materijali, Pomorski fakultet Split, 2010.
- [10] Deva Preservation Services Pte. The basics of corrosion. Dostupno: <https://www.preservemetals.com/the-basics-of-corrosion/> (Pristupljeno: 01.02.2025.)
- [11] Dostupno: <https://coxengineering.sharepoint.com/Pages/Corrosion.aspx> (Pristupljeno: 10. 07. 2024.)
- [12] Dostupno: <https://www.behaelter-kg.de/en/insights/Pitting-corrosion-and-rust-on-stainless%20steel-What-are-the-causes-and-solutions.html#> (Pristupljeno: 08.08.2024.)

-
- [13] WordPress. Galvanic corrosion. Dostupno: <https://hongten91.wordpress.com/tag/galvanic-corrosion/> (Pristupljeno:08.08.2024.)
- [14] Metal supermarkets. What is weathering steel? Dostupno: <https://www.metalsupermarkets.com/what-is-weathering-steel/> (Pristupljeno: 15.01.2025.)
- [15] Masteel UK. Weathering steel. Dostupno: [Weathering Steel | Corten Steel | Corrosion Resistant Steel](#) (Pristupljeno: 15.01.2025.)
- [16] Lesičar K., Konstrukcijski čelici poboljšane otpornosti na atmosfersku koroziju. Diplomski rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2020.
- [17] Bašić B., Analiza mikrostrukture zavarenog spoja Corten čelika. Diplomski rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [18] Orešković L., Korozijska postojanost Corten čelika u različitim medijima. Završni rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2020.
- [19] Serdar M., Stipanović Oslaković I., Bjegović D., Primjena nehrđajućih čelika kao armature u betonu. Građevinar [Internet]. 2010., Str. 219-227. Dostupno: <https://hrcak.srce.hr/50007>
- [20] Azo materials. Weathering steel: A guide to Corten and the A/B Equivalentes, orgins and standards. Dostupno:<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12974> (Pristupljeno: 15.01.2025.)
- [21] Cesarec P., Usporedba korozijske postojanosti Corten čelika u različitim medijima. Diplomski rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2021.
- [22] Wikipedia. CORTEN čelik. Dostupno:https://hr.wikipedia.org/wiki/CORTEN_%C4%8Delik (Pristupljeno: 10.08.2024.)
- [23] Gnee Corten Steel. Weathering steel: Vodič za Corten i A/B ekvivalente, porijeklo, standarde. Dostupno:<https://hr.cortensteels.com/news/weathering-steel-a-guide-to-corten-and-the-a-59338282.html> (Pristupljeno: 15.01.2025.)
- [24] Serto-bel. Općenito o nehrđajućem čeliku- Inoxy. Dostupno: <https://www.serto-bel.hr/inox-opcenito/index.html> (Pristupljeno: 20.12.2024.)
- [25] Grgić M., Korozijska svojstva nehrđajućih čelika u morskom okolišu. Diplomski rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2022.

-
- [26] Juraga I., Stojanović I., Šimunović V., Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje. 4.seminar, Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula, 2007.
- [27] KONIMB. Što je nehrđajući čelik? Dostupno: https://www.konimb.hr/blog/sto_je_inox.html (Pristupljeno: 15.01.2025.)
- [28] Barišić M., Svojstva nehrđajućih čelika. Završni rad. Karlovac: Strojarski odjel, Proizvodno strojarstvo, Veleučilište u Karlovcu, 2015.
- [29] Mecanizado Garrigues. AISI 304. Dostupno: <https://www.mecanizadosgarrigues.es/materiales-de-mecanizados-garrigues/aisi-304/> (Pristupljeno: 10.07.2024.)
- [30] HRN4You. HRN EN 1993-1-4:2014. – Projektiranje čeličnih konstrukcija: opća pravila-Dodatna pravila za nehrđajuće čelike. Dostupno: <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+1993-1-4%3A2014> (Pristupljeno:20.12.2024.)
- [31] Jagran Josh. What is difference between Steel and Stainless Steel. Dostupno: <https://www.jagranjosh.com/general-knowledge/what-is-the-difference-between-steel-and-stainless-steel-1518080822-1> (Pristupljeno: 08.08.2024.)
- [32] HRN4You. HRN EN 1993-1-1:2014. – Projektiranje čeličnih konstrukcija: opća pravila i pravila za zgrade. Dostupno: <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+1993-1-1%3A2014> (Pristupljeno: 20.12.2024.)

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz oksidacije željeza i redukcije kisika [4]	2
Slika 2. Klasifikacija korozijskih procesa [6]	4
Slika 3. Primjer kemijske korozije [7]	5
Slika 4. Primjer elektrokemijske korozije [8]	6
Slika 5. Primjer neravnomjerne opće korozije [6]	7
Slika 6. Primjer selektivne korozije [10]	8
Slika 7. Primjer interkristalne korozije čelične cijevi [7]	8
Slika 8. Primjer pjegaste korozije [11]	9
Slika 9. Primjer rupičaste korozije [12]	10
Slika 10. Primjer galvanske korozije [13]	10
Slika 11. Prikaz strukture hrđe čelika otpornog na koroziju i običnog čelika [16]	11
Slika 12. Promjena boje patine tijekom vremena [17]	12
Slika 13. Primjer građevine od Corten čelika [22]	13
Slika 14. Prikaz nastanka pasivnog filma [25]	16
Slika 15. Samoobnova sloja kromovih oksida [26]	17
Slika 16. Schaefflerov dijagram [26]	17
Slika 17. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika[28]	19
Slika 18. Nehrđajući čelik AISI 304 [29]	19
Slika 19. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [26]	20
Slika 20. Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [26]	21
Slika 21. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika[26]	22
Slika 22. Izbjegavanje nakupljanja nečistoća [30]	24
Slika 23. Izbjegavanje procjepa [30]	24
Slika 24. Primjer izgleda nehrđajućeg i običnog čelika [31]	25
Slika 25. Najveći omjer širine i debljine [30]	27

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva Corten-A čelika [20]	14
Tablica 2. Kemijski sastav Corten-A čelika [20]	14
Tablica 3. Mehanička svojstva Corten-B čelika [20]	14
Tablica 4. Kemijski sastav Corten-B čelika [20]	15
Tablica 5. Mehanička svojstva Patinax 355P čelika [23]	15
Tablica 6. Kemijski sastav Patinax 355P čelika [23]	15
Tablica 7. Maseni udjeli elemenata u strukturi austenitnih nehrđajućih čelika [28]	18
Tablica 8. Predložene kvalitete nehrđajućeg čelika za primjenu u okolišu [30]	23
Tablica 9. Nazivne vrijednosti granice popuštanja i vlačne čvrstoće za konstrukcijske nehrđajuće čelike prema normi EN 10088 [30]	26
Tablica 10. Vrijednosti λ_0 i $\bar{\lambda}_0$ za izvijanje uz savijanje, torzijsko izvijanje i torzijsko izvijanje uz savijanje [30]	32
Tablica 11. Vrijednost za n [30]	35
Tablica 12. Nazivne vrijednosti za f_{yb} i f_{ub} nehrđajućih čeličnih vijaka [30]	36